



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**

**INGENIERO CIVIL**

**TÍTULO DE LA DISERTACIÓN**

**EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO  
CON LA UTILIZACIÓN DE DISPOSITIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA  
FRICCIONALES, ACOPLADOS CON UN MECANISMO DE AMPLIFICACIÓN  
DE DESPLAZAMIENTOS “ELAS”.**

**NOMBRE**

**NINAHUALPA VILLEGAS JOSÉ MARCELO**

**DIRECTOR**

**ING. JUAN SEBASTIÁN BAQUERO**

**QUITO, DICIEMBRE DE 2016**

## **DEDICATORIA**

Deseo dedicar este trabajo principalmente a mi Madre, que ha realizado el trabajo de padre y madre a la vez, por su fortaleza, por su comprensión durante lo que llevo de vida, por su cariño y amor brindado, por el ejemplo que ha sido para mí.

Para mi Padre, que, aunque no se encuentra presente, sé que me ha guiado y protegido en todos los pasos que he dado en mi vida, por su ejemplo y sus buenos recuerdos que quedaron en mí.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios y a mi Padre, que desde el cielo siempre me han acompañado y han sabido guiarme por el camino del bien.

Quiero agradecer a mi Madre por todo su apoyo a lo largo de toda mi vida, en especial en el apoyo brindado a lo largo de mi carrera, que aparte de un ejemplo sano ha sido un soporte en todos los aspectos de mi vida.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis y amigo, Ing. Juan Sebastián Baquero, por su ayuda prestada a lo largo de este camino, por su apoyo y paciencia, por sus consejos fuera de aulas, por las cosas compartidas.

También a mis profesores correctores, Ing. Marcelo Guerra y Ing. Oscar Jaramillo, que han sabido guiarme y ayudarme cuando los necesité.

A mis amigos, Paul Palacios y Jonathan Plaza, agradezco por su amistad, por su apoyo brindado en esta etapa de mi vida, por sus consejos y experiencias vividas.

A mis amigos de universidad, Alexis Espín, Talia Quevedo, Conchis Burgos, Cindy Ocaña, Marco Benavides y Pablo Acosta, gracias por tantas cosas que vivimos durante la duración de la carrera, por su apoyo.

A mis amigos Topitos FC, en especial a Ivan Verdezoto y Pablo Andrade, han sido una segunda familia para mí, gracias por las experiencias vividas y por el apoyo brindado.

A mi abuelo y abuela paternos, por forjar mi carácter, por recordarme siempre quien soy y de que somos capaces, gracias mi piloto.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESÚMEN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
1. GENERALIDADES .....	2
1.1. Introducción .....	2
1.2. Antecedentes .....	3
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos .....	4
1.4. Justificación.....	5
1.5. Marco Teórico.....	8
1.5.1. Métodos convencionales de análisis de estructuras. ....	8
1.5.2. Normativa legal del Ecuador. ....	10
1.5.3. Normativa extranjera. ....	11
1.5.3.1. Normativa para estructuras convencionales. ....	11
1.5.3.2. Normativa para estructuras con sistemas de protección sísmica.....	12
1.5.4. Hormigón armado como material de construcción.....	13
1.5.5. Estructuras con sistemas de protección sísmico .....	15
1.5.6. Mecanismos adicionales a la disipación de energía suplementaria. ....	18
CAPÍTULO II .....	24
2. DEFINICIONES PRELIMINARES.....	24
2.1. Definición de la estructura a diseñar. ....	24
2.2. Definición de la zona y tipo de suelo de implantación.....	25
2.3. Definición del sistema de protección sísmica y amplificador a usar.....	26
2.3.1. Diagonal (Sistema sin amplificación) .....	29
2.3.2. Toggle Brace (Sistema de amplificación) .....	32
2.3.3. Sistema Eccentric Lever-Arm “ELAS” .....	40
CAPÍTULO III.....	47
3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO .....	47
3.1. Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC2015.....	47
3.2. Normas extranjeras.....	48

CAPÍTULO IV .....	52
4. ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL .....	52
4.1. Diseño de la estructura sin disipadores de energía.....	52
4.2. Diseño de la estructura con disipadores de energía. ....	76
4.2.1. Diseño de una estructura con disipadores de energía en condiciones ideales, acoplados de una manera convencional (diagonal).....	81
4.2.2. Diseño de una estructura con disipadores de energía en condiciones ideales, acoplados con mecanismos de ampliación de desplazamientos.....	83
CAPÍTULO V .....	86
5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DISEÑO.....	86
5.1. Análisis técnico de resultados en condiciones ideales (comportamiento óptimo de brces). ....	86
5.1.1. Resultados de una estructura sin mecanismo adicional de protección sísmica. 87	
5.1.2. Resultados de una estructura con disipadores de energía, acoplados de una manera convencional (diagonal), con condiciones ideales.....	96
5.1.3. Resultados de una estructura con disipadores de energía, acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos (TOGGLE – BRACE y “ELAS”) en condiciones ideales. ....	108
5.2. Gráficos de resumen de resultados entre los modelos con comportamiento óptimo de brces, descritos anteriormente. ....	121
5.3. Análisis económico comparativo, considerando condiciones reales, entre disipadores con acople convencional en diagonal versus disipadores acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”. ....	125
5.3.1. Análisis económico y Pre dimensionamiento en condición real de disipadores acoplados en diagonal. ....	125
5.3.1.1. Pre dimensionamiento de elementos de acople en configuración diagonal. 128	
5.3.1.2. Análisis económico de disipadores acoplados en diagonal.....	129
5.3.2. Análisis económico y Pre dimensionamiento en condición real de disipadores acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”.130	
5.3.2.1. Pre dimensionamiento de elementos de acople en configuración “ELAS”. 133	
5.3.2.2. Análisis económico de disipadores acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”.....	136

5.3.3. Gráficas comparativas del resultado de un análisis económico entre una estructura con el uso de disipadores acoplados en diagonal versus un acople con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS” .....	138
5.4. Costo total del proyecto .....	140
5.5. Esquema de acople disipador – estructura, aplicando mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS” en condiciones reales.....	141
CAPÍTULO VI.....	142
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	142
ANEXOS .....	147
ANEXO 1 “TABLA FEMA 356, VIGAS CONCRETO” .....	147
ANEXO 2, “TABLA FEMA 356, COLUMNAS CONCRETO” .....	148
ANEXO 3, “DESARROLLO RIGIDEZ EQUIVALENTE (ELAS-DIAGONAL)” .....	149

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1, Sistemas de conexión comúnmente utilizados, (a) Configuración en diagonal y (b) Configuración tipo chevron; (Choi &amp; Kim, 2010)</i> .....	19
<i>Figura 2, Sistemas de amplificación, (a) toggle system, (b) scissor-jack; (Choi &amp; Kim, 2010)</i> .....	22
<i>Figura 3, Sistema de amplificación de desplazamientos "Lever Arm"</i> .....	23
<i>Figura 4, Ex Edificio del Banco Central, Jipijapa, Manta</i> .....	25
<i>Figura 5, Ex edificio Banco Central, Jipijapa, Manta</i> .....	25
<i>Figura 6, (a) Diagrama esquemático de una conexión atornillada con ranuras (CAR); (b) diagrama de fuerza-desplazamiento de una CAR. (Adaptada de C. E. Grigorian y E. P. Popov, 1994)</i> .....	28
<i>Figura 7, Disipador Friccionante. (Symans et al., 2008)</i> .....	28
<i>Figura 8, Sistema de conexión diagonal en un pórtico. (Baquero &amp; Almaz, 2015)..</i>	30
<i>Figura 9, Sistema de conexión diagonal, se muestra ángulo de inclinación y factor de amplificación. (Eeri et al., 2003)</i> .....	31
<i>Figura 10, Sistema de configuración Toggle-Brace-Damper, factores de magnificación y factores de amortiguamiento de un piso, de una estructura con disipadores viscosos</i> .....	34
<i>Figura 11, Análisis del sistema "Toggle Brace"</i> .....	35
<i>Figura 12, Análisis de las fuerzas actuantes en el sistema Toggle-Brace</i> .....	40
<i>Figura 13, Configuración típica de Eccentric Lever-Arm System "ELAS", (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i> .....	41
<i>Figura 14, Lever-Arm System, (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i> .....	42
<i>Figura 15, Sistema "ELAS", DISTRIBUTED DAMPING SYSTEM, (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i> .....	43
<i>Figura 16, Eccentric Lever-Arm System, sin disipadores, (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i> .....	44
<i>Figura 17, Diagrama de Palanca (ICR), (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i> .....	46
<i>Figura 18, Esquema de Planta de cimentación edificio Bco. Central, línea entrecortada negra representa cadenas, unidad de medida (m).</i> .....	54
<i>Figura 19, Esquema planta de Mezzanine, unidad (m)</i> .....	55
<i>Figura 20, Esquema planta primer piso, Edf Bco. Central, Manta, Jipijapa, unidades (m).</i> .....	56
<i>Figura 21, Esquema Cuadro de Columnas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta, unidades (m).</i> .....	58
<i>Figura 22, Esquema Cuadro de Columnas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta, unidades (m).</i> .....	59
<i>Figura 23, Esquema de plano de vigas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta.</i>	60
<i>Figura 24, Configuración de vigas utilizadas en el modelo.</i> .....	61
<i>Figura 25, Espaciamiento de Ejes, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL</i> .....	62
<i>Figura 26, Propiedad de Material, hormigón, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.</i>	63

<i>Figura 27, Propiedad de Material, acero refuerzo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 28, Configuración de refuerzo columna, Section Designer, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 29, Configuración de refuerzo viga, Section Designer, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 30, Modelo asignado vigas y columnas, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 31, Definición de características de losa, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 32, Modelo estructural incluido losa, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL ..</i>	<i>67</i>
<i>Figura 33, Definición Características muro subsuelo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 34, Configuración de diafragma gradas posteriores, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 35, Modelo estructural incluido muros de corte y subsuelo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 36, Modelo estructural incluido muros de corte y subsuelo, vista frontal, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 37, Cargas aplicadas en modelo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 38, Registro de aceleraciones, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 39, Registro de aceleraciones, Norte, Portoviejo .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 40, Caso de carga TIME-HISTORY, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 41, Ingreso de Hinges, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 42, Definición de hinges en vigas, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 43, Definición de hinges en columnas, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL</i>	<i>75</i>
<i>Figura 44, Corrida de programa, SAP2000. Edificio BNC CENTRAL. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 45, Disipador como elemento link, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 46, Comportamiento Histerético, Wen, SAP2000.(Computers and Structures Inc., 2015) .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 47, Propiedades de elemento link, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 48, Comportamiento de elemento Wen en base a exponente, SAP2000. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 49, Comando para dibujar elemento link en SAP2000.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 50, Modelo estructural con disipadores en configuración diagonal, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 51, Configuración tipo diagonal equivalente a mecanismos de amplificación de desplazamientos, SAP2000. Edificio BNC CENTRAL. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 52, Elemento link en forma horizontal, conectando a diagonales. SAP2000, Edificio BCN CENTRAL .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 53, Diagrama Fuerza-Desplazamiento igual a Momento-Curvatura, SAP2000.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 54, Resultado análisis SAP2000, articulaciones formadas en columnas y vigas. ....</i>	<i>88</i>



<i>Figura 55, Resultado análisis SAP2000, articulaciones formadas en columnas y vigas.</i>	88
<i>Figura 56, Resultado análisis SAP2000, articulaciones formadas en columnas y vigas.</i>	89
<i>Figura 57, Derivas inelásticas modelo sin disipadores, SAP2000.</i>	90
<i>Figura 58, Deformación elástica por piso, modelo estructural sin disipadores.</i>	91
<i>Figura 59, Desplazamiento máximo en 4to piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm).</i>	91
<i>Figura 60, Desplazamiento máximo en 3er piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm).</i>	91
<i>Figura 61, Desplazamiento máximo en 2do piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm).</i>	92
<i>Figura 62, Desplazamiento máximo en 1er piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm).</i>	92
<i>Figura 63, Cortante Basal en x, modelo estructural sin disipadores, SAP2000.</i>	92
<i>Figura 64, Cortante Basal en y, modelo estructural sin disipadores, SAP2000.</i>	93
<i>Figura 65, Fuerza axial de columna 26 primer piso, modelo estructural sin disipadores, SAP2000.</i>	94
<i>Figura 66, Fuerza cortante columna 26 primer piso, modelo estructural sin disipadores, SAP2000.</i>	94
<i>Figura 67, Momento de columna 26 primer piso, modelo estructural sin disipadores, SAP2000.</i>	95
<i>Figura 68, Rótulas plásticas post análisis, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	96
<i>Figura 69, Rótulas plásticas post análisis, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	97
<i>Figura 70, Rótulas plásticas post análisis, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	97
<i>Figura 71, Derivas inelásticas modelo con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	99
<i>Figura 72, Deformación elástica por piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	99
<i>Figura 73, Desplazamiento máximo en 4to piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	100
<i>Figura 74, Desplazamiento máximo en 3er piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	100
<i>Figura 75, Desplazamiento máximo en 2do piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	101
<i>Figura 76, Desplazamiento máximo en 1er piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	101
<i>Figura 77, Cortante Basal en x, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	102
<i>Figura 78, Cortante Basal en y, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.</i>	102

<i>Figura 79, Fuerza axial actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 80, Cortante actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 81, Momento actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 82, Ciclo de histéresis de disipador, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 83, Input de energía, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 84, Energía absorbida por disipadores, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 85, Comparación de energía ingresada vs energía disipadores, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 86, Rótulas plásticas formadas, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 87, Rótulas plásticas formadas, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 88, Rótulas plásticas formadas, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 89, Deriva inelástica de piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000 .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 90, Deformación elástica por piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 91, Desplazamiento 4to piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000 .....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 92, Desplazamiento 3er piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000 .....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 93, Desplazamiento 2do piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000 .....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 94, Desplazamiento 1er piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000 .....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 95, Cortante Basal en x, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000 .....</i>	<i>115</i>

<i>Figura 96, Cortante Basal en y, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	115
<i>Figura 97, Fuerza axial actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	116
<i>Figura 98, Cortante actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	117
<i>Figura 99, Momento actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	117
<i>Figura 100, Ciclo de Histéresis disipador, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	118
<i>Figura 101, Energía ingresada, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	119
<i>Figura 102, Energía absorbida por disipador, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	120
<i>Figura 103, Comparación Energía ingresada vs energía disipador, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i>	120
<i>Figura 104, Rigidez equivalente utilizada para obtención de dimensiones reales de elementos ELAS</i>	127
<i>Figura 105, Elemento de acople para una configuración en diagonal, en condición real</i>	128
<i>Figura 106, Configuración palanca-diagonal en mecanismo ELAS, (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i>	131
<i>Figura 107, Rigidez equivalente utilizada para obtención de dimensiones reales de elementos ELAS</i>	132
<i>Figura 108, Elemento de acople en configuración "ELAS", elemento diagonal</i>	135
<i>Figura 109, Alternativa de elemento diagonal en configuración "ELAS"</i>	135
<i>Figura 110, Elemento tipo palanca en configuración "ELAS", en condiciones reales</i>	136
<i>Figura 111, Esquema de acople disipador - estructura, aplicando un mecanismo de amplificación de desplazamientos "ELAS"</i>	141
<i>Figura 112, Componentes de deformación palanca-diagonal, (a) deformación total, (b) componente rígido, (c) componente flexible palanca, y (d) componente flexible diagonal, (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i>	149
<i>Figura 113, Configuración palanca-diagonal mecanismo "ELAS", (Baquero &amp; Almaz, 2015)</i>	151

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1, Valores de <math>\Delta_M</math> máximos, expresados como fracción de la altura de piso.(CAMICON &amp; MIDUVI, 2015b)</i> .....	48
<i>Tabla 2, Deriva de piso admisible, <math>\Delta_a^{ab}</math>, (BSSC, 2003a)</i> .....	49
<i>Tabla 3, Derivas de piso, modelo sin disipadores, SAP2000.</i> .....	90
<i>Tabla 4, Derivas de piso, modelo estructural con disipadores en diagonal.</i> .....	98
<i>Tabla 5, Derivas de piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000</i> .....	111
<i>Tabla 6, Derivas de piso con modelo estructural con disipadores de energía acoplados en diagonal convencionalmente.</i> .....	127
<i>Tabla 7, Derivas de piso, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo ELAS, con rigidez equivalente.</i> .....	132
<i>Tabla 8, Resumen costo de mecanismo de acople</i> .....	137

## ÍNDICE DE FOTOS

<i>Foto 1, Plano, Planta de Cimentación, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta ..</i>	<i>53</i>
<i>Foto 2, Planta Mezzanine, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta.....</i>	<i>55</i>
<i>Foto 3, Planta Primer Piso, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta.....</i>	<i>56</i>
<i>Foto 4, Cuadro de Columnas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta.....</i>	<i>57</i>
<i>Foto 5, Plano de Vigas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta .....</i>	<i>60</i>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, desplazamientos elásticos y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores. ....</i>	<i>121</i>
<i>Gráfico 2, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, derivas inelásticas y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores. ....</i>	<i>121</i>
<i>Gráfico 3, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, cortante basal "x" y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores. ....</i>	<i>122</i>
<i>Gráfico 4, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, cortante basal "y" y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores. ....</i>	<i>122</i>
<i>Gráfico 5, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, fuerza axial actuante en columna 26 y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores. ....</i>	<i>123</i>
<i>Gráfico 6, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, fuerza cortante actuante en columna 26 y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores. ....</i>	<i>123</i>
<i>Gráfico 7, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, momento actuante en columna 26 y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores. ....</i>	<i>124</i>
<i>Gráfico 8, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, fuerza requerida en disipador y factor de amplificación referente a cada mecanismo de acople de disipadores. ....</i>	<i>124</i>
<i>Gráfico 9, Comparación económica entre disipadores según su fuerza o capacidad. ....</i>	<i>138</i>
<i>Gráfico 10, Comparación económica entre los mecanismos de acople a desarrollarse. ....</i>	<i>139</i>
<i>Gráfico 11, Comparación del costo total requerido para disipadores en el edificio del antiguo banco central, según la capacidad necesaria de cada disipador. ....</i>	<i>139</i>
<i>Gráfico 12, Comparación económica entre la utilización de mecanismos de acople en diagonal y "ELAS". ....</i>	<i>140</i>

## **RESÚMEN**

Para el reforzamiento de la estructura del antiguo banco central, ubicada en Manta, Jipijapa, la cual se vio afectada por el terremoto del 16 de abril, se ha propuesto la utilización de disipadores de energía acoplados a la estructura mediante mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”.

Con el fin de evaluar las ventajas que tiene la aplicación de la tecnología mencionada anteriormente se requerirá realizar modelos estructurales sin la utilización de disipadores y con la utilización de estos, acoplando los disipadores de una manera convencional y con mecanismos de amplificación de desplazamientos, en el software SAP2000, para obtener una comparación en cuanto a resultados de derivas se refiere entre los modelos mencionados anteriormente.

Al ser la estructura mencionada anteriormente de hormigón armado, tendrá poco desplazamiento, por ser una estructura rígida comparada a una estructura de acero, es por esto que en este tipo de estructuras se prefiere el uso de disipadores de energía acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos, llegando a amplificar los desplazamientos en el dispositivo lo que lleva a una mayor energía disipada en comparación a un acople convencional.

También al amplificar el desplazamiento en el disipador se reducirá la fuerza requerida en este, en la misma magnitud en la que se amplifica el desplazamiento, llegando a obtener fuerzas mucho menores en los disipadores acoplados con mecanismos de amplificación que con disipadores acoplados de una manera convencional, reduciendo también el costo del disipador requerido.

## **CAPÍTULO I**

### **1. GENERALIDADES**

#### **1.1. Introducción**

En vista de los acontecimientos sísmicos ocurridos recientemente, se ha considerado la necesidad de un sistema de reforzamiento no convencional, para lo cual he propuesto la utilización de mecanismos adicionales de disipación de energía (disipadores de energía) acoplados a un mecanismo de amplificación de desplazamientos; para ello hemos buscado una edificación afectada por el reciente terremoto, para su posterior evaluación.

Modelaremos el antiguo edificio del banco central que está ubicado en Jipijapa, Manta, afectado por el terremoto del 16 de abril del 2016. El modelamiento se ejecutará con la ayuda del software SAP2000.

Esto se realizará con el fin de obtener una comparación entre mecanismos de amplificación de desplazamientos versus una manera convencional de instalar los disipadores en la estructura, para obtener en específico las bondades del mecanismo de amplificación de desplazamiento “ELAS” (ECCENTRIC LEVER-ARM SYSTEM), en cuanto a las demás configuraciones a realizarse en esta tesis (TOGGLE-BRACE SYSTEM y CONFIGURACIÓN DIAGONAL).



## **1.2. Antecedentes**

En el Ecuador no es muy usual la utilización de mecanismos adicionales de protección sísmica, por ejemplo, el uso de disipadores de energía en estructuras, sean nuevas o antiguas.

En el edificio Foresta, ubicado en la ciudad de Quito, actualmente en construcción por la constructora Proaño y Proaño, inicialmente se promocionó el uso de disipadores de energía en esta edificación, en la que por costos finalmente no será aplicada esta tecnología.

Según Joan Proaño, gerente general de la empresa, indicó que este edificio contaría con una estructura sismo resistente, cumpliendo todas las normas ecuatorianas de construcción, y que además incluiría en su diseño disipadores de energía, se explica que estas son piezas instaladas en la estructura, encargadas de absorber la mayor cantidad de energía al momento de un sismo, teniendo así daños mínimos, ya que la energía no será transmitida directamente a la estructura. (Construir, 2015)

En Guayaquil, el Hotel Giardini, un inmueble de 17 pisos y 65 metros de altura, construido por la constructora Etinar, Sismoinnova y Burneo y Lantermo Arquitectos Asociados, utilizará un sistema de control estructural con disipadores sísmicos, su construcción empezó en el año 2013. (“Más hoteles y edificios para oficinas surgen en Guayaquil,” 2012).

En Manta, se reforzará mediante la utilización de disipadores el edificio de Molinos de Grupo Superior, este contará con 58 disipadores TADAS más 44 disipadores tipo SHEAR LINK.

Como podemos observar son pocas las construcciones que utilizan estos mecanismos, teniendo así muy poca información técnica del comportamiento de la estructura, es por esto que se propone en esta tesis realizar una evaluación más específica e incluir además de los disipadores, un mecanismo de amplificación de desplazamientos que pueda reducir los costos de los disipadores.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Diseño y evaluación comparativa de una edificación sin disipadores de energía con respecto a una edificación que posea estos mecanismos adicionales de protección sísmica, para así obtener un resultado que nos indique si es factible o no aplicar estos mecanismos en nuestro país sin que afecte económicamente al costo de una edificación, utilizando un mecanismo no convencional de acople entre disipador y estructura que además permita amplificar los efectos favorables del sistema de protección sísmica.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar una estructura de hormigón armado sin la utilización de ningún mecanismo adicional para la protección de eventos sísmicos, utilizando la norma NEC2015.
- Diseño de una estructura de hormigón armado con la utilización de disipadores de energía, mediante un mecanismo de amplificación de desplazamientos, en el cual se evaluará el impacto de este con respecto a la

otra estructura antes mencionada, para así poder observar que estructura es económicamente conveniente.

- Realizar el diseño de una estructura con disipadores de energía acoplados de manera convencional a la estructura, con el fin de mostrar las ventajas del uso de estos sistemas de protección sísmica y además definir un punto de referencia con respecto al mecanismo de amplificación que se propone usar.
- Observar si las derivas de piso se reducen con la aplicación de este nuevo mecanismo de amplificación de velocidad y desplazamiento, obteniendo así información que nos permita realizar una evaluación económica de las diferentes configuraciones de diseño.
- Mediante el mecanismo de amplificación de velocidad y desplazamiento se quiere reducir el tamaño de los disipadores de energía, para así poder observar su afectación en los nudos de la estructura, si esto fuera conveniente o no.

#### **1.4. Justificación**

Existen distintas acciones dinámicas que pueden afectar a estructuras de ingeniería, para definir brevemente, acción dinámica es aquella que tiene una variación muy rápida con respecto al tiempo, dando origen a fuerzas, las cuales pueden ser comparables en magnitud con fuerzas estáticas. (Cassano, 2009).

Entre las principales acciones dinámicas se encuentra, viento, olas y corrientes de agua, explosiones e impactos, cargas móviles y sismos. (Cassano, 2009).

Este estudio se centrará en eventos sísmicos, los cuales causan mayor problema en nuestra región, ya que Ecuador es un territorio sísmicamente activo.

Históricamente han existido sismos destructivos, entre los cuales podemos mencionar un sismo ocurrido en Esmeraldas en el año 1906, que tuvo una magnitud de 8.8, otro evento que se puede mencionar es el sismo ocurrido en Ambato, en el año 1949, de magnitud 6.8, el cual dejó 5050 fallecidos.(Ortiz Panchi, 2013)

Los eventos sísmicos pueden causar un daño severo o el colapso de la estructura, debido a la falla de un elemento o elementos con ductilidad o resistencia insuficiente, se puede presentar daños estructurales en columnas, vigas, losas y nudos.

Por lo dicho anteriormente, se establecen requisitos dentro de las normas de diseño sísmico, en el Ecuador por ejemplo se trabaja con la norma NEC 2015, vigente a la fecha con su capítulo NEC-SE-DS, esta norma nos entrega lineamientos para un diseño adecuado ante cargas sísmicas y además permite la utilización de mecanismos adicionales de protección sísmica.

En algunos países se ha venido implementando desde hace algunas décadas la utilización de mecanismos de protección ante eventos dinámicos, siendo el

aislamiento de base y los disipadores de energía suplementarios, los principales mecanismos utilizados para la disminución de los desplazamientos en estructuras debido a la presencia de eventos sísmicos fuertes.

Estos dos mecanismos pertenecen a un sistema pasivo, el cual se basa en un funcionamiento mecánico, el aislamiento de base consiste en desacoplar la estructura del movimiento del suelo, protegiendo así a esta del efecto del sismo. Esto se da gracias a unos dispositivos que tienen alta rigidez en sentido vertical y son flexibles en sentido horizontal, y estos se encuentran ubicados entre la cimentación y la estructura. Este método es recomendado en estructuras rígidas sobre terrenos rígidos. (Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Con respecto a los disipadores de energía, estos ayudan a que exista mayor amortiguamiento en el comportamiento dinámico y gracias a esto se reduzca la aceleración, dependiendo del tipo de disipador a instalar. Una estructura sin disipadores de energía resiste un sismo severo mediante la disipación de energía por deformación inelástica de sus elementos principales, pero estos obviamente sufrirán daños. En estructuras con disipadores de energía, estos mecanismos absorberán la energía y así reducirán significativamente las deformaciones y el daño en elementos estructurales. (Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

En nuestro país, al ser una zona de riesgo sísmico alto y tener edificaciones de hormigón antiguas, se puede utilizar disipadores de energía para reducir los efectos sísmicos en dichas edificaciones. Por lo mencionado anteriormente y en vista que actualmente el costo de las construcciones se ha incrementado por

la realidad actual de nuestro país, se ve la necesidad de evaluar las posibles ventajas que puede traer la utilización de disipadores de energía, los cuales pueden aumentar la vida útil de la estructura al reducir la demanda de respuesta estructural ante eventos sísmicos. Una de las ventajas que se puede percibir con la adición de estos mecanismos de disipación a nuestras estructuras, sería la de reducir las dimensiones de los elementos estructurales debido a que estos mecanismos absorberán la energía antes disipada por vigas y columnas, brindando una mayor resistencia sísmica a las estructuras reduciendo los desplazamientos o derivas de piso, más aún con la utilización de un mecanismo de amplificación de desplazamientos.

## **1.5. Marco Teórico**

### **1.5.1. Métodos convencionales de análisis de estructuras.**

Generalmente el cálculo de una estructura se lo realiza mediante procedimientos de obtención de fuerzas laterales, sean estos estáticos o dinámicos. El tipo de procedimiento dependerá de la configuración estructural, tanto en planta como en elevación, utilizándose así en estructuras regulares en planta y elevación procedimientos estáticos de determinación de fuerzas laterales, considerándose requisito mínimo la aplicación de este procedimiento para todas las estructuras. En los casos restantes de configuración estructural se utilizará el procedimiento de cálculo dinámico, el cual permite incorporar efectos torsionales y de modos de vibración distinto al fundamental. (CAMICON & MIDUVI, 2015b)

Como metodología de diseño sísmico la Norma Ecuatoriana de la Construcción propone lo siguiente, el método de Diseño Basado en Fuerzas (DBF), siendo este método utilizado para cualquier estructura, que es también de aplicación obligatoria. El otro método mencionado es de Diseño Directo Basado en Desplazamientos (DBD), este método se puede usar como una alternativa o complemento a la metodología antes mencionada (DBF), puede aplicarse para el diseño sismo resistente de estructuras regulares o con poca irregularidad y consiste en proporcionar un desplazamiento de diseño, el cual es función del desempeño de la estructura, proporcionando así la resistencia lateral requerida.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

Para aplicar el método de diseño basado en fuerzas (DBF) mencionado en el párrafo anterior, se pueden aplicar los procedimientos de obtención de fuerzas laterales (estático lineal y pseudo-dinámico), los cuales se dividen en tres procedimientos, análisis estático, análisis dinámico espectral y análisis dinámico paso a paso en el tiempo, presentando la misma metodología para los tres métodos, es decir se determinará el espectro de diseño en aceleración  $S_a$  (T) a partir del PGA.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

- Análisis estático.

Este método se aplicará como mínimo para todo tipo de estructuras, el cual consiste en definir el PGA mediante el factor Z, definiendo así el espectro en aceleración  $S_a$  (T).(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

- Análisis dinámico espectral.

En este método utilizaremos el espectro sísmico de respuesta elástico en aceleraciones, o se construirá el espectro mediante las curvas de peligro sísmico definidas en la norma NEC-SE-DS. Este método se aplicará obligatoriamente para todo tipo de estructuras irregulares.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

- Análisis dinámico paso a paso en el tiempo.

Aquí se utilizarán acelerogramas para el sitio específico que sean representativos de los terremotos reales esperados en la zona, cumpliendo los requisitos establecidos en las secciones 3.2 y 10.5.4 de la norma NEC-SE-DS. Este método se aplicará obligatoriamente para estructuras con sistemas de disipación de energía.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

### **1.5.2. Normativa legal del Ecuador.**

Para lograr un desarrollo ordenado y seguro de los Asentamientos Humanos, de la densificación de las ciudades y el acceso a una vivienda digna, se ha formulado una normativa gracias al trabajo del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

Tomando los objetivos descritos en el párrafo anterior y además considerando que nuestro país está localizado en una zona calificada de alto riesgo sísmico, el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda ha desarrollado un proceso de actualización de la Normativa Técnica referente a la seguridad Estructural de las Edificaciones, esto se realizó con el apoyo de la Cámara de la Industria de la Construcción, realizándose talleres de trabajo con



profesionales, aplicando también las mejores prácticas internacionales en el ámbito de la edificación.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

El objetivo de este proceso fue el de determinar nuevas normas de construcción con los avances tecnológicos existentes, con el fin de mejorar los mecanismos de control en el proceso constructivo, definir principios mínimos de diseño y fijar responsabilidades, obligaciones y derechos de los actores involucrados en los procesos de edificación.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

Teniendo así la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), la cual pretende dar respuesta a la demanda de la sociedad, mejorando la calidad y la seguridad de las edificaciones, fomentando a su vez un desarrollo urbano sostenible.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

### **1.5.3. Normativa extranjera.**

#### **1.5.3.1. Normativa para estructuras convencionales.**

Con el fin de proporcionar los requisitos mínimos para cualquier diseño o construcción de elementos de concreto estructural, se presenta el documento “*Requisitos de Reglamento para concreto estructural (ACI 318S - 14)*” por parte de American Concrete Institute; en lugares en donde no se cuente con un reglamento de construcción legalmente adoptado, este reglamento define las disposiciones mínimas aceptables en la práctica de diseño y construcción.(American Concrete Institute, 2011)

En lugares donde si exista un reglamento legalmente definido, este reglamento se utiliza como complementario, y rige en todos los aspectos relativos al diseño y construcción de concreto estructural, excepto cuando

esta norma entra en conflicto con la norma legalmente establecida, un aspecto importante que se toma en consideración en dicha norma, es que la categoría de diseño sísmico de una estructura estará regulada por el reglamento general de construcción legalmente adoptado.(American Concrete Institute, 2011)

Una vez mencionada la norma de diseño para elementos estructurales, se debe hacer referencia a las cargas utilizadas para diseño, “American Society of Civil Engineers, ASCE 7-11” provee cargas mínimas requeridas para el diseño de edificaciones y otras estructuras, lo que entrega requerimientos para carga muerta, viva, viento, hielo, lluvia, suelo y sísmica; con sus respectivas combinaciones.(STRUCTURAL ENGINEERING INSTITUTE, 2010)

#### **1.5.3.2. Normativa para estructuras con sistemas de protección sísmica.**

Uno de los objetivos del departamento de seguridad nacional “Federal Emergency Management Agency” (FEMA) y del Programa Nacional de reducción de Peligro Sísmico (“National Earthquake Hazards Reduction Program”, NEHRP) es el de promover el diseño y la práctica constructiva, que incluyen el peligro o amenaza sísmica y minimizar el riesgo resultante de daños y lesiones.(BSSC, 2003a)

Gracias a este requerimiento es presentada la publicación denominada, “*NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation of New Buildings and Other Structures*”, lo que es un adecuado final a los 25 años

de NEHRP y reafirma el apoyo continuo de FEMA, para el mejoramiento de la seguridad sísmica de la construcción en este país. (BSSC, 2003a)

Con el fin de presentar criterios de diseño y construcción de estructuras que resistan movimientos sísmicos (BSSC, 2003a), se ha presentado la norma dicha normativa, la cual busca también minimizar el riesgo para la vida de todas las estructuras, así como aumentar el rendimiento esperado de edificaciones que poseen un riesgo importante por su ocupación y uso, comparadas a estructuras ordinarias y mejorando la capacidad de funcionamiento después de un terremoto de las instalaciones o edificaciones esenciales.(BSSC, 2003b)

#### **1.5.4. Hormigón armado como material de construcción.**

“El Hormigón o concreto es una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros agregados unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua.”(McCormac, 2005). En ocasiones se pueden agregar a esta mezcla aditivos para mejorar sus propiedades, según los requerimientos que tengamos.

Cabe recalcar que el hormigón tiene poca resistencia a la tensión y alta resistencia a la compresión, debido a esta poca resistencia a la tensión se ve la posibilidad de involucrar un material más para que cumpla esta deficiencia del hormigón, a lo que se llama concreto reforzado.(McCormac, 2005)

El concreto reforzado es una combinación de hormigón y acero, en la cual el refuerzo de acero brinda la resistencia requerida a tensión y además este es capaz de resistir esfuerzos de compresión utilizándose en columnas, así como en otros miembros estructurales.(McCormac, 2005)

“El concreto reforzado es probablemente el material disponible más importante para la construcción. Puede usarse en cualquier estructura, sea grande o pequeña, edificios, puentes, pavimentos, presas, muros de retención, túneles, viaductos, instalaciones de drenaje, tanques, etc.”(McCormac, 2005)

Como ventajas importantes del hormigón reforzado se pueden nombrar las siguientes, tiene una resistencia considerable a la compresión en comparación a otros materiales, también posee una alta resistencia al fuego y al agua, siendo el mejor material estructural que existe en los casos en que el agua se halle presente. (McCormac, 2005)

Otra ventaja que se puede nombrar es que los miembros de concreto reforzado son muy rígidos requiriendo poco mantenimiento, su bajo costo hace que sea un material importante para zapatas, muelles y construcciones similares, una propiedad importante del hormigón es que se lo puede colar en una variedad de formas que van desde simples losas, vigas y columnas, hasta grandes arcos y cascarones.(McCormac, 2005)

Las desventajas que tenemos en este material son las siguientes, se requiere encofrado para mantener el concreto en posición hasta que adquiriera una resistencia adecuada o endurezca suficientemente, también se puede requerir apuntalamiento para apoyar el encofrado de techos, muros o estructuras similares.(McCormac, 2005)

Continuando con las desventajas se tiene que la baja resistencia por unidad de peso de concreto conduce a miembros pesados, así como la baja resistencia por unidad de volumen del concreto implica que los miembros serán

relativamente grandes, lo que es de considerable importancia en edificios altos y en estructuras con grandes claros.(McCormac, 2005)

Algo importante por mencionar es que las propiedades del concreto varían ampliamente debido a las variaciones en su dosificación y mezclado, además, el colado y el curado del concreto no son tan cuidadosamente controlados como la producción de otros materiales, por ejemplo el acero estructural y la madera laminada.(McCormac, 2005)

Por lo tanto, como conclusión obtenemos que el concreto u hormigón reforzado es un material muy importante en el ámbito estructural, debido a que brinda propiedades adicionales al hormigón simple y su utilización es muy variada.

#### **1.5.5. Estructuras con sistemas de protección sísmico**

Recientes sismos han demostrado que las estructuras construidas de acuerdo a los códigos convencionales proveen una buena respuesta, pero los daños causados tienen un costo muy alto, así como el tiempo de reparación de las edificaciones.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Como objetivo a lo expuesto anteriormente, ciertos países como Estados Unidos, Japón y Rusia, han desarrollado criterios de diseño sísmico y procedimientos para asegurar objetivos específicos de desempeño, se han propuesto técnicas innovadoras las cuales pueden usarse individualmente o en conjunto con el único fin de mejorar el desempeño sísmico de las edificaciones.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Estas técnicas innovadoras pueden estar divididas en tres grupos: *sistemas pasivos*, como aislamiento de base y dispositivos de disipación de energía; *sistemas activos*, estos requieren participación activa de dispositivos mecánicos, los cuales están controlados para cambiar sus características durante la respuesta sísmica y sistemas de control estructural híbrido, los cuales son una combinación de sistemas activos y pasivos, de tal manera que la seguridad de la edificación no esté comprometida si el sistema activo llegase a fallar.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Se puede decir que los sistemas pasivos se basan en elementos que responden de forma inercial frente a un evento sísmico, funcionando así sin la utilización de energía, los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controlador a tiempo real y dispositivos sensores instalados en la estructura.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

- **Dentro de los sistemas pasivos tenemos:**

Los aisladores de base, los cuales se mencionaban en un párrafo anterior, se pueden encontrar situados sobre la cimentación y soportando al edificio, así como también en un piso intermedio o desde donde se deforme la edificación, desacoplando parcialmente a esta del suelo, ayudarán a disminuir la energía de entrada, como también la respuesta estructural.

Los disipadores de energía no alteran la energía de entrada, lo cual depende básicamente del periodo fundamental y de la masa del edificio, su eficiencia se encuentra maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

- **Otros sistemas:**

El sistema activo de control estructural antes mencionado sirve también para contrarrestar los efectos del sismo con la ayuda de actuadores, estos sistemas son poco robustos debido a la necesidad de gran cantidad de energía y a la complejidad de sus algoritmos de control; estos sistemas consisten en sensores y sistemas controladores, los cuales medirán la excitación externa y respuesta estructural para poder calcular la fuerza que se aplicará por parte de los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Los sistemas de control híbrido son muy similares a los sistemas de control activo mencionados en el párrafo anterior, su diferencia consiste en que intervienen elementos pasivos los cuales actúan como reductores energéticos ante un sismo, debido a que el control se determina por el funcionamiento de un dispositivo pasivo se llega a concluir que en caso de falla del

sistema activo el sistema pasivo seguirá funcionando como controlador.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

En la actualidad el sistema de aislamiento sísmico es usado comúnmente entre los sistemas mencionados anteriormente. En nuestro país aún no existe una edificación que tenga alguno de estos sistemas.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

#### **1.5.6. Mecanismos adicionales a la disipación de energía suplementaria.**

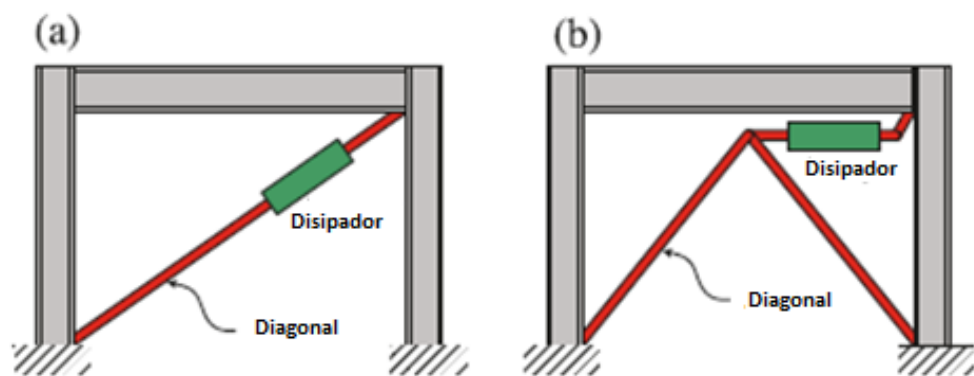
Estos sistemas suplementarios de disipación de energía mencionados en el párrafo anterior realizan una función de mejoramiento en cuanto al desempeño de la respuesta sísmica y del control de daño, en estos sistemas se incorporan dispositivos mecánicos en el pórtico de la estructura, disipando energía a lo largo de toda la altura de la edificación. Se disipará energía por medio de la fluencia de metales, fricción por deslizamiento, movimiento de un pistón, fluido a través de un orificio o la acción viscoelástica en materiales poliméricos.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Se obtendrá entonces un incremento de disipación de energía por unidad de desplazamiento de una estructura, además de esto, algunos sistemas de disipación de energía también incrementan la resistencia y rigidez, entre estos están incluidos los sistemas de fluencia de metales, fricción y viscoelásticos; los sistemas de disipación mediante fluido viscoso no incrementan la resistencia o rigidez de una estructura excepto que la frecuencia de excitación sea muy alta.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)



Estos dispositivos de disipación se activan mediante el desplazamiento y la velocidad de desplazamiento de piso. (Baquero Mosquera, 2015); para colocar estos dispositivos en edificaciones existen dos maneras comúnmente usadas: (a) Se conecta la viga con una estructura auxiliar formada por dos elementos en sentido de una V invertida, encontrándose el dispositivo conectado de manera horizontal, este sistema es conocido como tipo chevron; y (b) se conectan los nudos del pórtico mediante sistemas que trabajarán con disipadores conectados en forma oblicua o diagonal. (Baquero Mosquera, 2015), (Eeri, Constantinou, & Eeri, 2003). Los sistemas de conexión se indican en la figura 1 que se encuentra a continuación.

Estos sistemas de conexión son comúnmente utilizados debido a que todos los estudios de investigación experimental han utilizado solo estas dos configuraciones para disipación de energía y también se debe a la familiaridad de estos sistemas. (Eeri et al., 2003)



*Figura 1, Sistemas de conexión comúnmente utilizados, (a) Configuración en diagonal y (b) Configuración tipo chevron; (Choi & Kim, 2010)*

Como se puede observar, el sistema de conexión diagonal es mucho más simple, sin embargo, este solo absorbería una fracción del desplazamiento de piso. (Baquero Mosquera, 2015); Se entiende entonces que por su configuración el desplazamiento de los dispositivos de disipación es menor (en caso de diagonal) e igual (en caso de chevron) a la deriva de piso, es decir el factor de magnificación es igual a 1 en dispositivos colocados con una configuración tipo chevron, e igual a  $\cos\phi$  en disipadores con una configuración en diagonal, siendo  $\phi$  el ángulo de inclinación del dispositivo con respecto al eje horizontal.(Eeri et al., 2003)

Por lo expuesto anteriormente, se puede concluir que con las configuraciones convencionales requeriremos grandes cantidades de fuerza en el disipador ya que estos dependen del desplazamiento, por lo que no se podrá disipar grandes cantidades de energía.

Debido a los desplazamientos mínimos que se tendrán en estructuras rígidas como edificaciones construidas con muros de hormigón armado, la implementación de disipadores de energía resultará difícil o muchas veces impracticable debido a que, los disipadores no tendrían un efecto importante al momento de absorber energía. (Baquero Mosquera, 2015)

Para solucionar el inconveniente mencionado en el anterior párrafo, se han propuesto varios mecanismos de amplificación de desplazamientos, los cuales pueden incrementar la eficiencia de los dispositivos de disipación, amplificando deformaciones y velocidades en los dispositivos.(Ribakov, Reinhorn, & Asce, 2003)

Uno de los mecanismos de amplificación de desplazamientos desarrollado se denomina *toggle-brace*, el cual se basa en el mecanismo de palanca, lo que magnifica el desplazamiento de un dispositivo para una deriva de piso dada, resultando en una reducción de la fuerza requerida de amortiguamiento y en la reducción en el volumen del disipador, lo que crea una reducción en el costo del disipador. La fuerza del amortiguador o dispositivo es magnificada mediante el mismo mecanismo y entregada al sistema de pórtico.(Eeri et al., 2003)

Una consideración importante a tomarse con el tipo de configuración o sistema (*toggle-brace*) mencionado anteriormente, es que este mecanismo ocupa gran parte del el vano de los pórticos, violando así requerimientos arquitectónicos como espacio y vista obstaculizada, (Eeri et al., 2003).

Otro sistema creado y denominado *scissor-jack* fue variante de *toggle-brace-damper system*, estos se muestran en la figura 2, el sistema *scissor-jack* combina magnificación de desplazamiento con un tamaño pequeño de disipador o dispositivo, lo cual se logra a través de compacidad e instalación cercana vertical, Fue demostrado que este sistema magnifica el desplazamiento de disipador y reduce la fuerza de disipador requerida mientras produce el deseado efecto de amortiguamiento.(Eeri et al., 2003), (Ribakov et al., 2003)

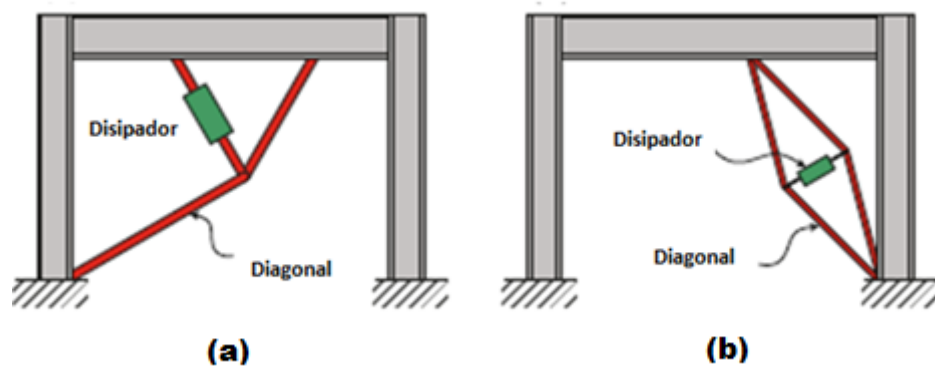


Figura 2, Sistemas de amplificación, (a) toggle system, (b) scissor-jack;

(Choi & Kim, 2010)

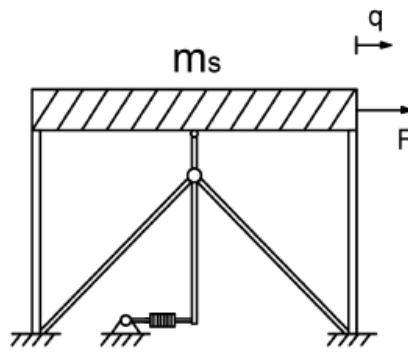
Sin embargo, una desventaja importante de estos sistemas de amplificación mencionados anteriormente es el alto costo, así como las técnicas sofisticadas requeridas en su análisis y detalle.(Choi & Kim, 2010)

Otro sistema de amplificación de desplazamientos, que ha sido estudiado se denomina *lever arm*, Gluck (1996) propuso el uso de palancas (levers) con la finalidad de cambiar las características de amortiguamiento en una estructura mientras incrementa su eficiencia magnificando la deriva y las velocidades de deriva que son transferidas de la estructura a los disipadores.(Ribakov et al., 2003)

Ribakov et al. (2000) desarrolló un procedimiento para el diseño de estructuras controladas pasivamente, usando disipadores conectados a la estructura mediante brazos de palanca (lever arm). El sistema mostrado en la Figura 3 consiste en, Chevron, en V invertida conectado con un brazo de palanca (lever arm) por medio de bisagras y también conectado al diafragma

de piso; una placa es usada para conectar los dos elementos de sistema Chevron brace con el brazo de palanca (lever arm).

Cuando la estructura desarrolla una deriva horizontal en el piso superior, el brazo de palanca (lever arm) gira en torno a la bisagra, por lo tanto la deriva de desplazamiento magnificado y velocidad de deriva de piso son transferidas al disipador en la parte inferior de la palanca. (Ribakov et al., 2003)



*Figura 3, Sistema de amplificación de desplazamientos "Lever Arm".*

## **CAPÍTULO II**

### **2. DEFINICIONES PRELIMINARES**

#### **2.1. Definición de la estructura a diseñar.**

La estructura a diseñar se encuentra en el Cantón Jipijapa, perteneciente a la provincia de Manabí, es una estructura compuesta de elementos de hormigón armado, con una resistencia de hormigón de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , la cual se comprobó utilizando un esclerómetro.

Esta edificación es denominada “Ex Edificio del Banco Central de Jipijapa”, la estructura actualmente pertenece a la “Universidad Estatal del Sur de Manabí (UNESUM)”, como se puede apreciar en la figura 4.

Se podrá describirla también como una edificación de 5 pisos, como se puede observar en la figura 5, ubicada entre las calles Víctor M. Rendón y Santisteban en dirección Este – Oeste, posee una losa de cimentación.

Su construcción inició en agosto del año 1981 y culminó en el año 1985. Estructuralmente está conformada por un sistema de marcos de hormigón armado, para este año ya existían guías de diseño sismo resistente, basadas sobre el proyecto del código ecuatoriano de la construcción. En esta guía ya se menciona que las dimensiones mínimas de una columna deben ser de 30 cm, sobre vigas no se menciona nada, únicamente que se prefiere que las rótulas plásticas se den en éstas.



*Figura 4, Ex Edificio del Banco Central, Jipijapa, Manta*



*Figura 5, Ex edificio Banco Central, Jipijapa, Manta*

## **2.2. Definición de la zona y tipo de suelo de implantación.**

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), en el capítulo de Peligro Sísmico (NEC-SE-DS), sección 10.2 (“Poblaciones ecuatorianas y valor del factor  $Z$ ”), se define la zona en que se encuentra nuestra edificación y el factor  $Z$ , mediante el cual vamos a poder caracterizar el peligro sísmico en dicha zona.

Para la edificación en estudio, la cual se encuentra ubicada en la provincia de Manabí, cantón Jipijapa, nos indica un valor de  $Z$  igual a 0.5, lo que indica

que esta zona se caracteriza como de peligro sísmico alto.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

### **2.3. Definición del sistema de protección sísmica y amplificador a usar.**

El sistema de protección sísmica a plantearse incluye dispositivos de disipación sísmica (“*disipadores de energía*”), los cuales pertenecen al sistema de control pasivo, como anteriormente se mencionó, estos sistemas no requieren ninguna cantidad de energía externa para su funcionamiento, su respuesta no es controlable, dependiendo únicamente de las condiciones de trabajo en las que se encuentren. Se caracterizan por alterar las propiedades dinámicas de la estructura, reduciendo la respuesta estructural, siendo así económicamente competitivos.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Dentro de los elementos que conforman el sistema de control pasivo, se encuentran los *disipadores de energía*, los cuales se caracterizan por su robustez, no depender de fuentes de energía, ser mecánicamente simples, en especial tienen la característica de no alterar la energía de entrada (la cual depende principalmente de la masa y período fundamental del edificio), sino de disipar la energía disminuyendo la respuesta estructural.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

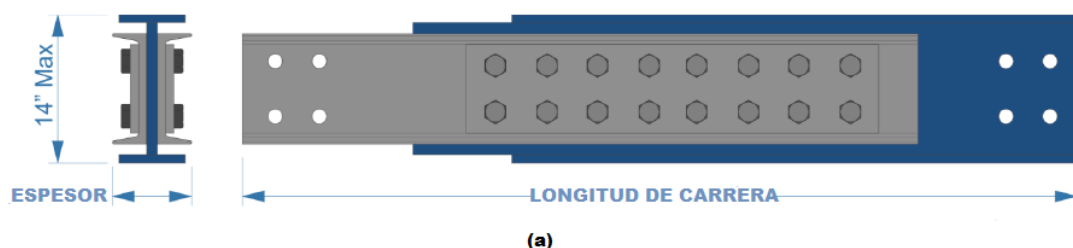
Como se mencionó anteriormente, existen varios tipos de disipadores de energía, entre estos se encuentran: *disipadores histeréticos (dependen del desplazamiento)*, *viscoelásticos (dependen de la velocidad)* y *friccionantes (dependen del desplazamiento)*.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009).

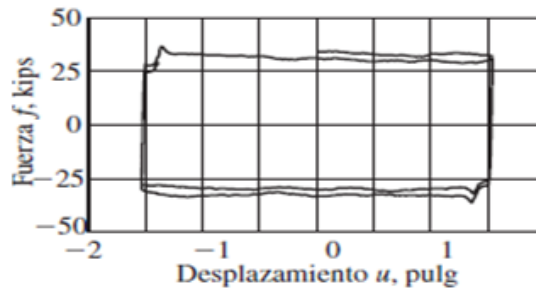


Se escogerá entonces el dispositivo de *disipación mediante fricción* para los estudios y diseños a realizarse, este tipo de disipador consiste en disipar la energía mediante el rozamiento entre superficies, teniendo una fuerza de fricción en cada conexión igual al producto de la fuerza normal (fuerza de ajuste de elementos o placas) por el coeficiente de rozamiento.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Este tipo de disipador es capaz de aumentar la disipación de energía en una estructura, pero no cambia los periodos naturales de vibración (entre 10 y 20%).(Lewandowski, Co-investigador, & Lewandowski, 2015)

Un ejemplo sencillo para un mejor entendimiento del sistema es el que se presenta en la figura 6, (a) denominado conexión atornillada con ranuras (CAR), (b) se presenta un esquema del diagrama de histéresis, el cual es casi rectangular(Lewandowski et al., 2015), “*lo cual indica que la energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento*”(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, pág 38, 2009).





(b)

Figura 6, (a) Diagrama esquemático de una conexión atornillada con ranuras (CAR); (b) diagrama de fuerza-desplazamiento de una CAR. (Adaptada de C. E. Grigorian y E. P. Popov, 1994)



Figura 7, Disipador Friccionante. (Symans et al., 2008)

Una desventaja de este dispositivo se presenta durante el desplazamiento, en el cual el coeficiente de fricción depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto, así también es difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores, se muestra un ejemplo de un disipador en la figura 7. (Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta a la respuesta estructural, si la estructura permaneciera en rango lineal, mientras que esta influencia puede ser significativa si esta entra en rango no lineal.(Dr. Villareal & M.Sc. Oviedo, 2009)

Este estudio plantea no uno sino varios sistemas de instalación del dispositivo de disipación de energía para poder realizar una comparación de la respuesta estructural. Se propone entonces realizar un análisis entre dos sistemas de amplificación de desplazamientos y uno de los sistemas convencionales de instalación de dispositivos de disipación de energía, uno de los sistemas de amplificación será el propuesto en esta tesis.

Como se mencionaba anteriormente, se escogerá un sistema de instalación convencional (sin amplificación) y dos sistemas de amplificación de desplazamientos los cuales son, respectivamente:

#### **2.3.1. *Diagonal (Sistema sin amplificación)***

Este es uno de los sistemas convencionales o típicos de conexión entre pisos, el cual se basa en una disposición del disipador en forma oblicua o diagonal, conectando así de una manera directa los nudos o uniones viga-columna de un pórtico, tal como se muestra en la figura 8. (Baquero Mosquera, 2015)

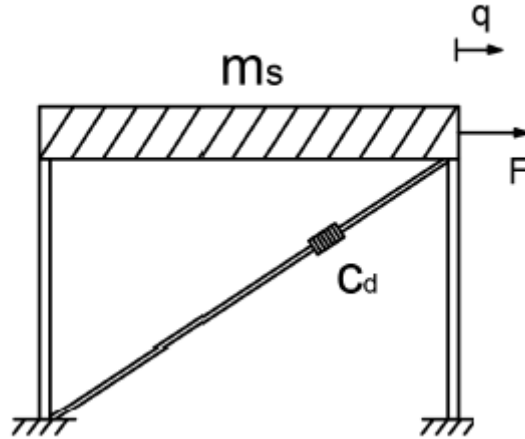


Figura 8, Sistema de conexión diagonal en un pórtico. (Baquero & Almaz, 2015)

Sin embargo las deformaciones en los disipadores pueden no ser lo suficientemente largas para disipar una cantidad significativa de energía (Choi & Kim, 2010), como es observable, el sistema diagonal es práctico y sencillo, pero este sistema solo aprovechará una fracción de la deformación de entrepiso (Baquero Mosquera, 2015). Es decir, el desplazamiento del dispositivo de disipación de energía es menor a la deriva de entrepiso.

Si  $q$  es igual a la deriva de entrepiso y  $u_D$  es el desplazamiento relativo del dispositivo de disipación de energía, entonces

$$u_D = f \cdot q \quad (1)$$

Donde  $f$  es un factor de magnificación, para la conexión tipo diagonal  $f = \cos \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación del disipador respecto del eje horizontal, la fuerza  $F_D$  a lo largo del eje del dispositivo de disipación esta igualmente relacionada con la fuerza  $F$ , la cual es la componente horizontal de la fuerza del dispositivo actuante en la estructura (Eeri et al., 2003), entonces

$$F = f \cdot F_D \quad (2)$$

En la figura 9 se muestra un esquema de lo hablado anteriormente, en donde se observa que con un ángulo de 37 grados se obtiene un factor de reducción de 0.8, con lo cual se reduce en un 20 % la deriva de piso, llegando así a tener el dispositivo de disipación un desplazamiento del 80 % de la deriva de piso.

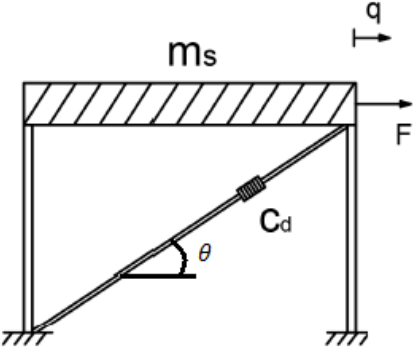
DIAGONAL		$f = \cos \theta$	$\theta = 37^\circ$ $f = 0.80$ $\beta = 0.03$
----------	---	-------------------	---

Figura 9, Sistema de conexión diagonal, se muestra ángulo de inclinación y factor de amplificación. (Eeri et al., 2003)

Para fines prácticos se puede asumir, un pórtico de un piso, con peso  $W$  y periodo fundamental  $T$  (para condiciones elásticas), la utilización de un dispositivo de disipación de energía de tipo viscoso, en el cual su fuerza es igual a,

$$F_D = C_o \cdot \dot{u}_D \quad (3)$$

Donde  $C_o$  es el coeficiente de amortiguamiento y  $\dot{u}_D$  es la velocidad relativa del disipador a lo largo de su eje, por lo tanto, el factor de amortiguamiento ( $\beta$ ) es,

$$\beta = \frac{C_o \cdot f^2 \cdot g \cdot T}{4 \cdot \pi \cdot W} \quad (4)$$

Se demuestra así la importancia de la configuración del sistema de disipación de energía, mediante el efecto que causa el factor de amplificación, el cual

influye directamente en el factor de amortiguamiento ( $\beta$ ), un dispositivo de disipación escogido para entregar un factor de amortiguamiento del 5 %, en la configuración tipo diagonal entregará un factor de amortiguamiento de 3.2 %. (Constantinou et al., 2001)

Como estos dispositivos funcionan o se activan mediante los desplazamientos de entrepiso, este tipo de sistema convencional no presenta ningún inconveniente en las estructuras flexibles, pero tratándose de estructuras rígidas, tendremos menores deformaciones de entre piso y por lo tanto velocidades pequeñas, esto resulta en el requerimiento de fuerzas grandes en los dispositivos de disipación para la efectiva disipación de energía. (Constantinou et al., 2001)

Es por esto que el mencionado sistema (*Diagonal*) resulta difícil o muchas veces impracticable. (Baquero Mosquera, 2015)

Para dar una solución a este problema mencionado en el anterior párrafo, se ha propuesto sistemas que combinan dispositivos de disipación de energía con mecanismos amplificadores de desplazamiento. (Baquero Mosquera, 2015), que son los que se proponen usar y se describen en los puntos siguientes.

### **2.3.2. Toggle Brace (Sistema de amplificación)**

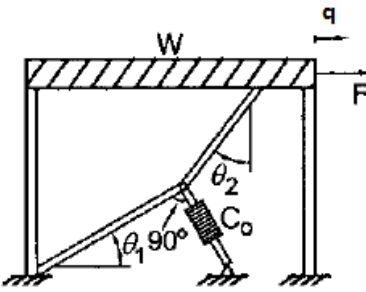
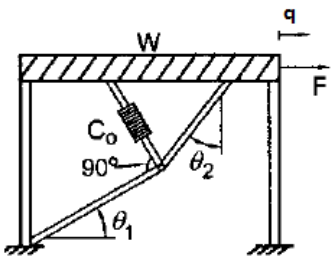
Por lo expuesto anteriormente, aparecen mecanismos de amplificación de desplazamientos, una de las configuraciones propuestas es un mecanismo de palanca (“toggle mechanism”), que resulta en desplazamientos mucho más grandes que la deriva de piso en el dispositivo de disipación, la manera de cuantificar su magnificación depende de la geometría de los brazos de palanca, Según Constantinou, estos valores se encuentran en el rango de 2 a 5

(Constantinou et al., 2001), con la magnificación de desplazamientos obtenida en el dispositivo de disipación, la fuerza requerida en el dispositivo es reducida en la misma cantidad de magnificación.(Constantinou et al., 2001)

La ecuación (4) descrita anteriormente, demuestra también que los mecanismos o configuraciones con un factor de magnificación ( $f$ ) mayor a la unidad, mejoran el factor de amortiguamiento ( $\beta$ ), sin la necesidad de incrementar la fuerza del dispositivo. (Constantinou et al., 2001)

$$\beta = \frac{C_o \cdot f^2 \cdot g \cdot T}{4 \cdot \pi \cdot W} \quad (4)$$

Para lograr una magnificación de desplazamiento, se utilizó armazones como se muestra en la figura, incrementando el efecto de deriva de piso y la pequeña fuerza del disipador, para entregarla a la estructura.

Lower Toggle		$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$	$\theta_1 = 31.9^\circ$ $\theta_2 = 43.2^\circ$ $f = 2.662$ $\beta = 0.354$
Upper Toggle		$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \sin \theta_1$	$\theta_1 = 31.9^\circ$ $\theta_2 = 43.2^\circ$ $f = 3.191$ $\beta = 0.509$

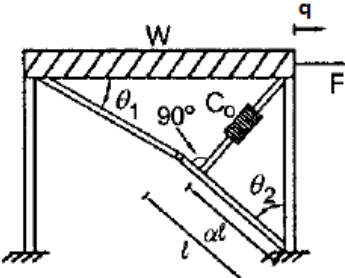
Reverse Toggle		$f = \frac{\alpha \cos \theta_1}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - \cos \theta_2$	$\theta_1 = 30^\circ$ $\theta_2 = 49^\circ$ $\alpha = 0.7$ $f = 2.521$ $\beta = 0.318$
----------------	---	--	--

Figura 10, Sistema de configuración Toggle-Brace-Damper, factores de magnificación y factores de amortiguamiento de un piso, de una estructura con disipadores viscosos

En la figura 10, mostrada anteriormente, si se utiliza el mecanismo de amplificación “Toggle-Brace-Damper”, el factor de amortiguamiento ( $\beta$ ), se encontrará entre 30 y 50 %, este desempeño se logra mediante factores de amplificación que se encuentran en el rango de 2.5 – 3.0, así el desplazamiento del dispositivo será de 2.5 a 3.0 veces la deriva de piso.(Constantinou et al., 2001)

Para estructuras con pequeños desplazamientos, los disipadores viscosos requieren un especial detalle, debido a que estos dependen de la velocidad, esto hace que su costo y su tamaño sea elevado, creando así un costo elevado del sistema (sin amplificación), por lo que un mecanismo de amplificación como Toggle-Brace-Damper, con un factor de magnificación grande puede llevar al ahorro y disminución de costos.(Constantinou et al., 2001)

El mencionado factor de magnificación se define como la relación entre el desplazamiento del dispositivo de disipación y el desplazamiento de entre piso,



$$f = \frac{u_D}{q} = \frac{|\overline{A'B'} - \overline{AB}|}{q}$$

En donde  $\overline{A'B'}$  y  $\overline{AB}$  representan las longitudes después y antes de la deformación, respectivamente, esto se puede apreciar mejor en la figura 11, en la cual no se muestra ninguna deformación en la estructura, así como alguna reducción en las longitudes de los elementos debido a la rotación de columnas. (Constantinou et al., 2001).

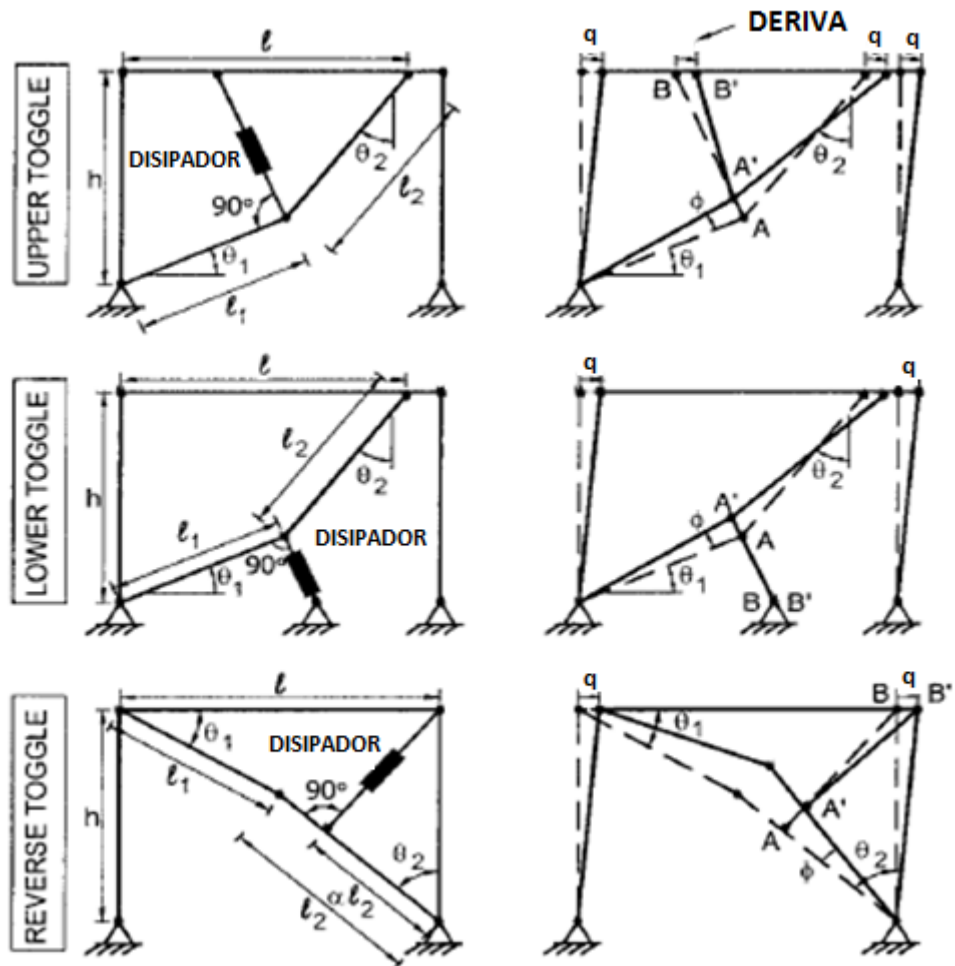


Figura 11, Análisis del sistema "Toggle Brace"

Sin embargo, se considera que las deformaciones en los elementos pueden causar cierto efecto en el factor de magnificación, por ejemplo, si se considera

en la figura mostrada anteriormente, una conexión rígida en la unión viga-columna derecha y una conexión simple en la unión izquierda, cuando ocurre un desplazamiento hacia la derecha, el punto B mostrado tratará de subir, lo que causa una reducción en el desplazamiento del dispositivo de disipación y en el factor de magnificación, sucederá lo contrario con el mismo movimiento hacia la derecha pero con la colocación de las conexión de diferente manera, es decir la conexión rígida a la izquierda y la conexión simple a la derecha.(Constantinou et al., 2001)

Sin embargo, independientemente de la configuración estructural del sistema, el factor de magnificación es reducido debido a desplazamientos causados por las fuerzas en el dispositivo y de los brazos de palanca.(Constantinou et al., 2001)

Siendo el desplazamiento del dispositivo establecido mediante la cinemática del sistema mostrado en la figura anterior y de las limitaciones mencionadas, teniendo las siguientes ecuaciones:

- Para el sistema “*Upper Toggle*”

$$u_D = \pm \left\{ \frac{h}{\cos \theta_1} - l_1 * \tan \theta_1 - \left[ \left( h * \tan \theta_1 - q - \frac{l_1}{\cos \theta_1} + l_1 * \cos(\theta_1 \pm \phi) \right)^2 + (h - l_1 * \sin(\theta_1 \pm \phi))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

- Para el sistema “*Lower Toggle*”

$$u_D = \pm l_1 * \left[ \left( 1 + \frac{1}{(\cos \theta_1)^2} - \frac{2 * \cos(\theta_1 \pm \phi)}{\cos \theta_1} \right)^{1/2} - \tan \theta_1 \right] \quad (7)$$

Donde el ángulo  $\phi$  es determinado por la siguiente ecuación de preservación de longitud:

$$l_2^2 = h^2 + l_1^2 + (l + q)^2 - 2 * h * l_1 * \sin(\theta_1 \pm \phi) - 2 * (l + q) * l_1 * \cos(\theta_1 \pm \phi) \quad (8)$$

- Para el sistema “Reverse Toggle”

$$u_D = \pm [\alpha * l_2 * \tan \theta_2 - \{[\alpha * l_2 * \sin(\theta_2 \mp \phi) + q]^2 + [h - \alpha * l_2 * \cos(\theta_2 \mp \phi)]^2\}^{1/2}] \quad (9)$$

Donde

$$l_1^2 = h^2 + l_2^2 + (l - q)^2 - 2 * h * l_2 * \cos(\theta_2 \mp \phi) - 2 * (l - q) * l_2 * \sin(\theta_2 \mp \phi) \quad (10)$$

La ecuación (6) y (10) nos muestra una compleja relación no lineal entre el desplazamiento del dispositivo  $u_D$  y la deriva de piso  $q$ , según Constantinou, la solución tiene un uso práctico complejo, debido a que el diseño del sistema “toggle” resulta en pequeñas rotaciones (ángulo  $\phi$ ), por lo tanto se pueden obtener expresiones simples para el factor de magnificación, las cuales se basan en retener únicamente los términos lineales de  $\phi$  y  $u$  de las ecuaciones (6) y (10) (Constantinou et al., 2001), obteniendo como resultado:

- Para el sistema “Upper Toggle”

$$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \sin \theta_1$$

(11)

- Para el sistema “Lower Toggle”

$$f = \frac{\sin \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$$

(12)

- Para el sistema “Reverse Toggle”

$$f = \frac{\alpha * \cos \theta_1}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \cos \theta_2$$

(13)

Así el factor de magnificación alcanzará valores altos, mediante la suma de los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , la cual se acerca a  $90^\circ$ .

La configuración de  $90^\circ$  es ciertamente, inútil, desde que la palanca formó un elemento recto que actúa como brazo.(Constantinou et al., 2001), siendo así de gran significancia la geometría del sistema toggle, ya que este puede afectar al factor de amplificación. Los valores del factor de magnificación, tomando las consideraciones anteriores, se encuentran entre 2-5.(Constantinou et al., 2001)

Un factor muy importante para la evaluación de la seguridad de los brazos de palanca y para establecer la relación entre la fuerza en el amortiguador y la componente horizontal que actúa sobre la estructura, es la determinación de las fuerzas en el sistema “toggle-brace”.(Constantinou et al., 2001)

La ecuación (2) presentada anteriormente, representa la relación entre la fuerza del dispositivo y la componente horizontal, donde  $f$  se obtiene mediante las

ecuaciones (11)-(13); a continuación se presenta la figura 12, en la cual se observa que la fuerza  $F$  representa la componente de la fuerza de inercia que es balanceada por fuerzas obtenidas mediante el sistema de disipación (Constantinou et al., 2001), presentándose así las siguientes fuerzas axiales en los brazos de palanca:

$$T_1 = F_D * \tan(\theta_1 + \theta_2) \quad (14)$$

$$T_2 = \frac{F_D}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (15)$$

$$T_3 = \frac{\alpha * F_D}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (16)$$

$$T_4 = \alpha * F_D * \tan(\theta_1 + \theta_2) \quad (17)$$

Se debe notar que las fuerzas  $T_1$  y  $T_2$  son de tensión, mientras que las fuerzas  $T_3$  y  $T_4$  son de compresión, además el brazo BC del sistema “Reverse Toggle” está sujeto a un momento flector, el cual es máximo en el punto de conexión al disipador y es igual a  $\alpha * (1 - \alpha) * F_D * l_2$  (Constantinou et al., 2001)

El equilibrio horizontal de la viga resulta en la relación entre la fuerza  $F$  y la fuerza del amortiguador  $F_D$ , según las ecuaciones antes descritas podemos llegar a la siguiente conclusión,

$$f = \frac{F}{F_D} = \frac{u_D}{u}$$

La última ecuación descrita resulta en  $F_D * u_D = F * u$ , la cual denota la exactitud del análisis, también demostrando lo dicho anteriormente sobre la disminución existente en la fuerza requerida del disipador, la cual se reducirá

en la misma proporción en que se amplifica el desplazamiento, usando el mecanismo de amplificación de desplazamientos.

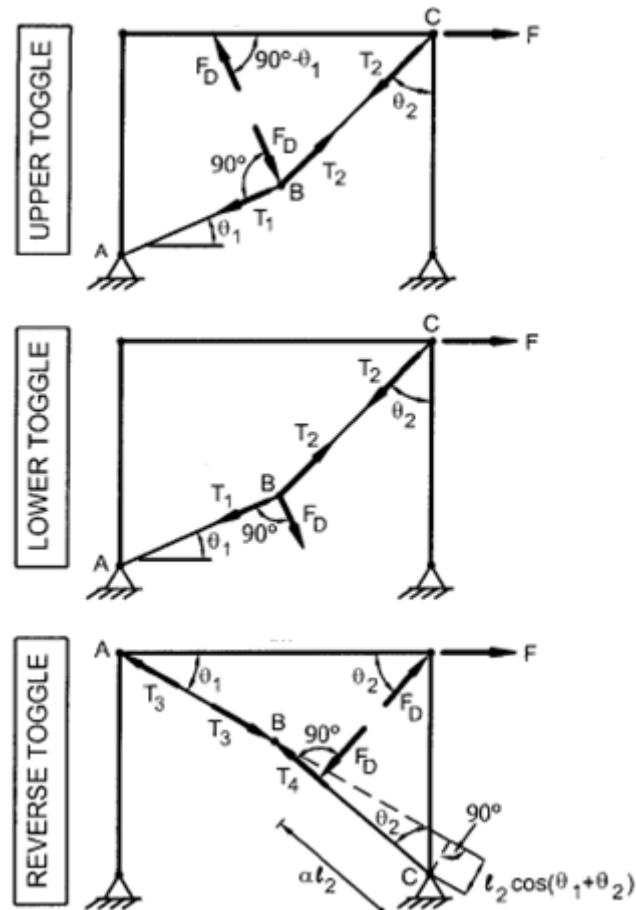


Figura 12, Análisis de las fuerzas actuantes en el sistema Toggle-Brace

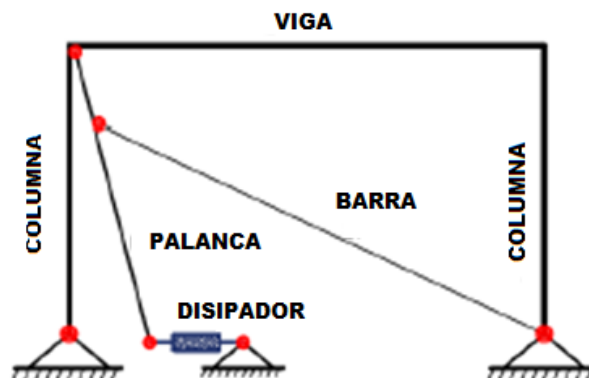
### 2.3.3. Sistema Eccentric Lever-Arm “ELAS”

Un mecanismo de amplificación adicional propuesto es el sistema “Eccentric Lever-Arm” (ELAS) y patentado por Baquero & Almaz, el cual se basa en la combinación de uno o más dispositivos de disipación de energía, capaces de soportar deformaciones largas, y se complementa con el mecanismo de amplificación, el cual es una variante del conocido sistema “Lever-Arm”. Este nuevo mecanismo de amplificación ha sido diseñado para alcanzar grandes

factores de amplificación, hablando de factores entre 7 y 13 veces la deriva o desplazamiento de entrepiso. (Baquero & Almaz, 2015)

Es importante mencionar que la eficiencia de los dispositivos para disipar energía, dependen también de la rigidez de los elementos conectores, los cuales transmitirán la deformación de la estructura principal o mejor llamada estructura secundaria o sistema secundario, hacia los dispositivos. (Baquero & Almaz, 2015)

La configuración típica del mecanismo propuesto (“ELAS”), es mostrada en la siguiente figura 12, solo un amortiguador o dispositivo de disipación es usado en este modelo.

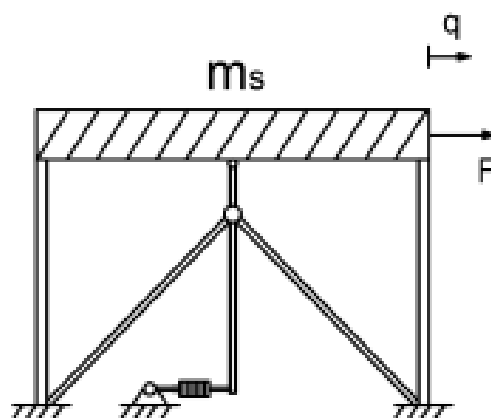


*Figura 13, Configuración típica de Eccentric Lever-Arm System "ELAS", (Baquero & Almaz, 2015)*

Existen algunas diferencias entre el sistema de “Eccentric Lever-Arm” y el sistema comúnmente reconocido “Lever-Arm”, entre las cuales podremos mencionar las siguientes:

- En el sistema “Lever-Arm”, mostrado en la figura 14, el brazo de palanca se encuentra de una manera simétrica en el centro del vano, conectado

mediante sus extremos, el punto medio de la viga con el dispositivo de disipación de energía; en cambio, el mecanismo propuesto “ELAS”, localiza su brazo de palanca en un lado del vano, el cual se encuentra conectado directamente con el nudo viga-columna en la estructura.(Baquero & Almaz, 2015)



*Figura 14, Lever-Arm System, (Baquero & Almaz, 2015)*

- El sistema “LAS” (Lever-Arm System), se encuentra acoplado a la estructura, mediante un sistema secundario tipo chevron; en el caso del sistema “ELAS”, este se encuentra acoplado a la estructura, con únicamente una barra diagonal.(Baquero & Almaz, 2015)

Existe otra manera de modelar este nuevo sistema (“ELAS”), el cual consiste en un mecanismo conformado por dos barras diagonales o cables, dos brazos de palanca y una barra colocada horizontalmente (barra acopladora), la cual cumple la función de conectar los extremos libres de los dos brazos de palanca, como se muestra en la figura 15.(Baquero & Almaz, 2015)



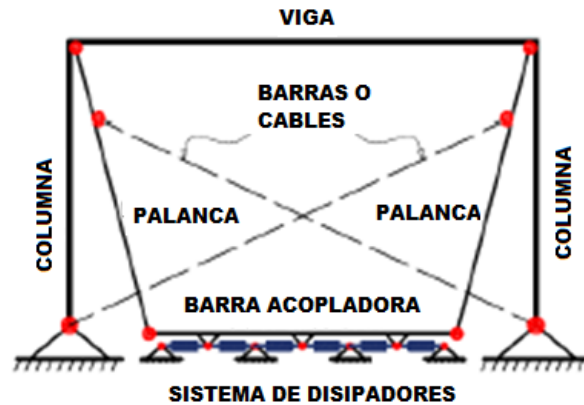


Figura 15, Sistema "ELAS", DISTRIBUTED DAMPING SYSTEM, (Baquero & Almaz, 2015)

Esta configuración es utilizada cuando se han instalado una serie de dispositivos de disipación de energía, los cuales poseen una pequeña capacidad de fuerza y se han instalado como un sistema de amortiguación distribuido, conectados a la barra horizontal o barra acopladora como se indica en la figura anterior.(Baquero & Almaz, 2015)

Es esencial mencionar que en esta configuración, existe la posibilidad de colocar barras diagonales o cables si se habla de esfuerzos de tensión, ya que al existir algún desplazamiento, la barra horizontal o barra acopladora transmitirá el desplazamiento en ambas direcciones, activándose así cualquier cable con este esfuerzo.(Baquero & Almaz, 2015)

Si consideramos la cinemática del sistema "ELAS" con disipación distribuida, con sus dispositivos de disipación desconectados, tal como se muestra en la figura 16.

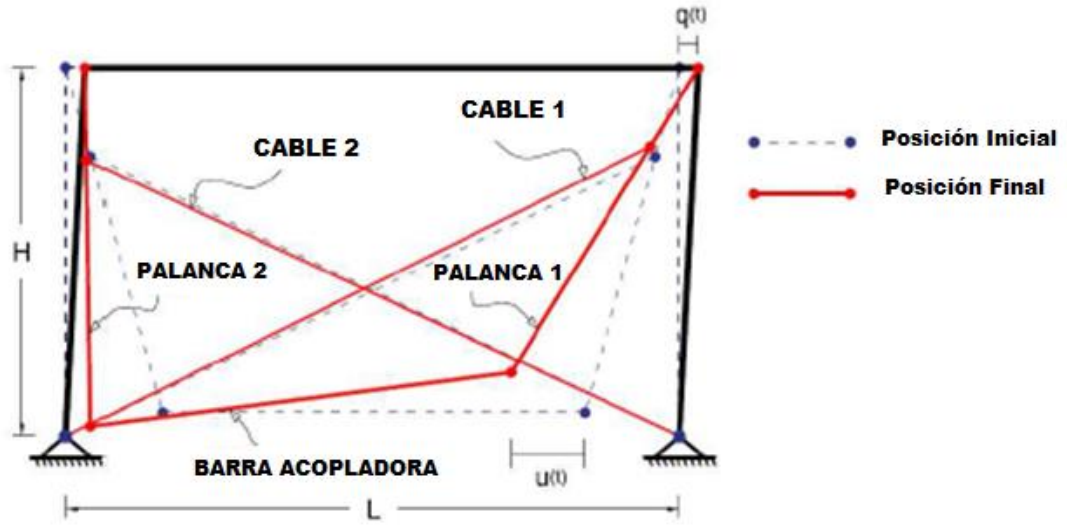


Figura 16, Eccentric Lever-Arm System, sin disipadores, (Baquero & Almaz, 2015)

Al ocurrir un desplazamiento ( $q$ ) hacia la derecha, el cable 1 se activará, causando una rotación en la palanca 1 (Lever 1), en sentido de las manecillas del reloj, teniendo así las siguientes ecuaciones:

$$L + q(t) = l_{d1} \cos \beta_1(t) + a \sin \theta_1(t) \quad (1a)$$

$$H = l_{d1} \sin \beta_1(t) + a \cos \theta_1(t) \quad (1b)$$

Donde  $H$  y  $L$ , son el ancho y largo de la armadura, respectivamente;  $l_{d1}$  es la longitud del Cable 1;  $\beta_1(t)$  es el ángulo entre el Cable 1 y el eje horizontal; y  $\theta_1(t)$  es el ángulo entre la Palanca 1 (Lever 1) y el eje vertical, tomando como positivo al sentido de las manecillas del reloj, simultáneamente, la Palanca 1 (Lever 1), envía hacia atrás a la barra acopladora  $u$  horizontal, lo que causa una rotación en la Palanca 2 (Lever 2) en sentido de las manecillas del reloj, lo cual satisface las siguientes ecuaciones:

$$L + q(t) - l_{p1} \sin \theta_1(t) = q(t) + l_{p2} \sin \theta_2(t) + l_c \cos \phi(t) \quad (2a)$$

$$H - l_{p1} \cos \theta_1(t) = H - l_{p2} \cos \theta_2(t) + l_c \cos \phi(t) \quad (2b)$$

Donde  $l_{p1}$  y  $l_{p2}$  son las longitudes de las Palancas 1 y 2, respectivamente;  $\theta_2(t)$  es el ángulo entre la Palanca 2 (Lever 2) y el eje vertical, considerado positivo en sentido de las manecillas del reloj; y  $\phi(t)$  el cuál es el ángulo entre la barra horizontal o acopladora y el eje horizontal, mientras que el Cable 2 permanece inactivo. Esta situación varía y el Cable 1 pasará a estar inactivo cuando el desplazamiento es dirigido hacia la izquierda. (Baquero & Almaz, 2015)

Se resolverá entonces la ecuación 1, obteniendo  $\theta_1(t)$  y  $\beta_1(t)$  en función de  $q(t)$ , luego con la solución de  $\theta_1(t)$ , se resuelve la ecuación 2, para las incógnitas  $\theta_2(t)$  y  $\phi(t)$ .

La secante y tangente del factor de amplificación, están definidos como sigue:

$$\alpha_{sec} = -\frac{u(t)}{q(t)}$$

$$\alpha_{tg} = -\frac{du}{dq} = -\frac{\dot{u}}{\dot{q}}$$

Donde  $u(t) = q(t) - l_{p1} \sin \theta_1(t)$  es el desplazamiento horizontal de la barra acopladora u horizontal, ya que los elementos del mecanismo han sido asumidos como perfectamente rígidos en este análisis cinemático, se podrá usar el concepto del Centro de Rotación Instantánea (ICR) para calcular  $\alpha_{tg}$ . (Baquero & Almaz, 2015)

Si aplicamos el concepto mencionado anteriormente, el Centro de Rotación Instantáneo de la Palanca (Lever), se encontrará en la intersección del Cable

activo con el eje vertical que pasa por el extremo superior de la Palanca, como se muestra en la figura 17.

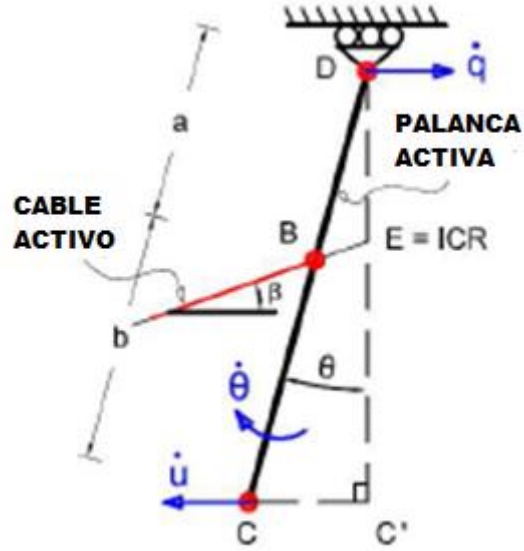


Figura 17, Diagrama de Palanca (ICR), (Baquero & Almaz, 2015)

Por lo tanto,

$$\alpha_{tg} = -\frac{\dot{u}}{\dot{q}} = \frac{\dot{\theta} \overline{EC}}{\dot{\theta} \overline{ED}} = \frac{l_p \cos \theta - \overline{ED}}{\overline{ED}}$$

Aplicando regla de senos para el triángulo BED, tenemos:

$$\overline{ED} = \alpha \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos \beta}$$

Sustituyendo ecuación (5) en ecuación (4), se obtiene:

$$\alpha_{tg} = \frac{a + b \cos \theta \cos \beta}{a \cos(\beta + \theta)} - 1 = (\alpha + 1) \frac{\cos \theta \cos \beta}{\cos(\beta + \theta)} - 1$$

## **CAPÍTULO III**

### **3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

#### **3.1. Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC2015.**

##### **3.1.1. Norma de Peligro Sísmico, NEC-SE-DS.**

Como objetivo principal del capítulo NEC-SE-DS de la norma ecuatoriana se tiene el reducir el riesgo sísmico, esto se puede lograr mediante el diseño de las estructuras para una resistencia tal que sea capaz de soportar los desplazamientos laterales inducidos por el sismo de diseño, mediante una filosofía de diseño basada en desempeño, la cual nos permite comprobar el nivel de seguridad de vida. (CAMICON & MIDUVI, 2015b)

Para el diseño estructural usualmente se utiliza el sismo de diseño mencionado en el párrafo anterior, evento sísmico que tiene una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años, equivalente a un período de retorno de 475 años. (CAMICON & MIDUVI, 2015b)

Uno de los requisitos para conseguir un diseño de estructura, relacionado con la filosofía de diseño, es que dicha estructura obtenga derivas de piso menores a las admisibles, las cuales se presentarán con la aplicación de fuerzas presentadas también por la norma NEC, capítulo NEC-SE-DS.(CAMICON & MIDUVI, 2015b)

En la norma NEC, se presenta la deriva máxima como un porcentaje de la altura de piso, teniendo los valores siguientes,

*Tabla 1, Valores de  $\Delta_M$  máximos, expresados como fracción de la altura de piso. (CAMICON & MIDUVI, 2015b)*

<b>Estructuras de:</b>	<b><math>\Delta_M</math> máxima (sin unidad)</b>
<b>Hormigón armado, estructuras metálicas y madera.</b>	0.02
<b>De mampostería.</b>	0.01

Se menciona también en el código como parte del cumplimiento de la filosofía de diseño, el requerimiento de disipación de energía inelástica, por parte de la estructura mediante la utilización de técnicas de diseño por capacidad, o mediante la utilización de dispositivos de control sísmico los cuales pueden ser disipadores de energía, propuestos para su utilización en esta tesis. (CAMICON & MIDUVI, 2015b)

### **3.2. Normas extranjeras.**

#### **3.2.1. Norma de diseño de estructuras con disipadores de energía FEMA 450**

De una manera comparativa podemos acotar que tanto en la norma NEC antes mencionada, como en la norma FEMA 450 existen límites de deflexión, dichos límites se establecen en la tabla presentada a continuación,

Tabla 2, Deriva de piso admisible,  $\Delta_a^{ab}$ , (BSSC, 2003a)

Estructura	Grupos de uso sísmico		
	I	II	III
Estructuras, otros que los que usan sistemas de mampostería sismo resistente, cuatro pisos o menos en altura con paredes interiores, cielo raso, y sistema de muro exteriores que han sido diseñados para acomodar las derivas de piso.	$0.025 h_{sx}^c$	$0.020 h_{sx}$	$0.015 h_{sx}$
Estructuras de muros de corte, mampostería en voladizo	$0.010 h_{sx}$	$0.010 h_{sx}$	$0.010 h_{sx}$
Otras estructuras de muros de corte y mampostería	$0.007 h_{sx}$	$0.007 h_{sx}$	$0.007 h_{sx}$
Pórticos resistentes a momento de mampostería	$0.013 h_{sx}$	$0.013 h_{sx}$	$0.010 h_{sx}$
Todas las otras estructuras	$0.020 h_{sx}$	$0.015 h_{sx}$	$0.010 h_{sx}$

Donde  $h_{sx}$  es la altura de piso bajo el nivel x, para  $h_{sx}^c$  no deberá haber límite de deriva para estructuras de un solo piso con paredes interiores y paredes exteriores que fueron diseñadas para acomodar los desplazamientos de piso, para estructuras con deflexiones torsionales significantes, el máximo desplazamiento o deriva deberá incluir efectos torsionales. (BSSC, 2003a)

Los grupos sísmicos I, II, III mencionados en la tabla corresponden a la importancia de la estructura, teniendo como primordiales a estructuras de ocupación especial pertenecientes al grupo III, en el grupo II tenemos a las estructuras de gran utilización o alta concurrencia de personas, y el grupo I restante corresponde al resto de estructuras(BSSC, 2003a).

Para las categorías de diseño sísmico D, E y F, la deriva de piso máxima debe cumplir con:

- La deflexión en el plano del diafragma, no deberá exceder la deflexión permisible de los elementos adjuntos, la que deberá permitir a dichos elementos mantener su integridad estructural bajo su carga individual y continuar soportando cargas.(BSSC, 2003a)
- Todo componente estructural que no forme parte del sistema resistente sísmico en la dirección en consideración, deberá ser diseñado para resistir cargas gravitacionales en combinación con los momentos inducidos y cortes resultantes del diseño de deriva de piso(BSSC, 2003a).

Como una excepción se menciona que las vigas y columnas y sus conexiones no son diseñadas como parte del sistema sismo



resistente, pero encontrando los requerimientos detallados ya sea para pórticos de momentos intermedios o pórticos de momentos especiales, son permitidos para ser diseñados para efectos de cargas gravitacionales en combinación con los momentos inducidos y cortes resultantes de la deformación del edificio bajo la aplicación de las fuerzas de diseño sísmico(BSSC, 2003a).

## **CAPÍTULO IV**

### **4. ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL**

Para llevar a cabo el diseño y posterior análisis del edificio del antiguo Banco Central, se ha utilizado el software SAP2000 como herramienta.

En primera parte y soportándose en planos, se modelará la estructura sin disipadores de energía.

En segundo plano se incluirá a la modelación disipadores de energía, proponiéndose aquí la utilización de tres tipos de acoplamiento “disipador-estructura”

- DIAGONAL, comúnmente utilizada.
- TOGGLE-BRACE SYSTEM, mecanismo de amplificación convencional.
- ECCENTRIC LEVER-ARM SYSTEM “ELAS”, mecanismo de amplificación propuesto para su utilización en esta tesis.

#### **4.1. Diseño de la estructura sin disipadores de energía.**

Se definirá varios pasos para la modelación de la estructura, la cual consta de 4 pisos, sin incluir tapa gradas; con una altura de entre piso de 3.78 m, irregular en planta y elevación. Dichos pasos constarán de todas las consideraciones tomadas durante este proceso.

- En primer lugar, con la utilización de planos, se definió la geometría en planta y elevación, así como la geometría de los elementos estructurales que conforman dicha estructura, a esquematizar en el software.

- Con el plano mostrado en la foto 1 con su esquematización en la figura 18, se define la configuración en planta de cimentación que tiene el modelo, tomando en cuenta la ubicación de los tipos de columnas existentes en la estructura.



*Foto 1, Plano, Planta de Cimentación, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta*

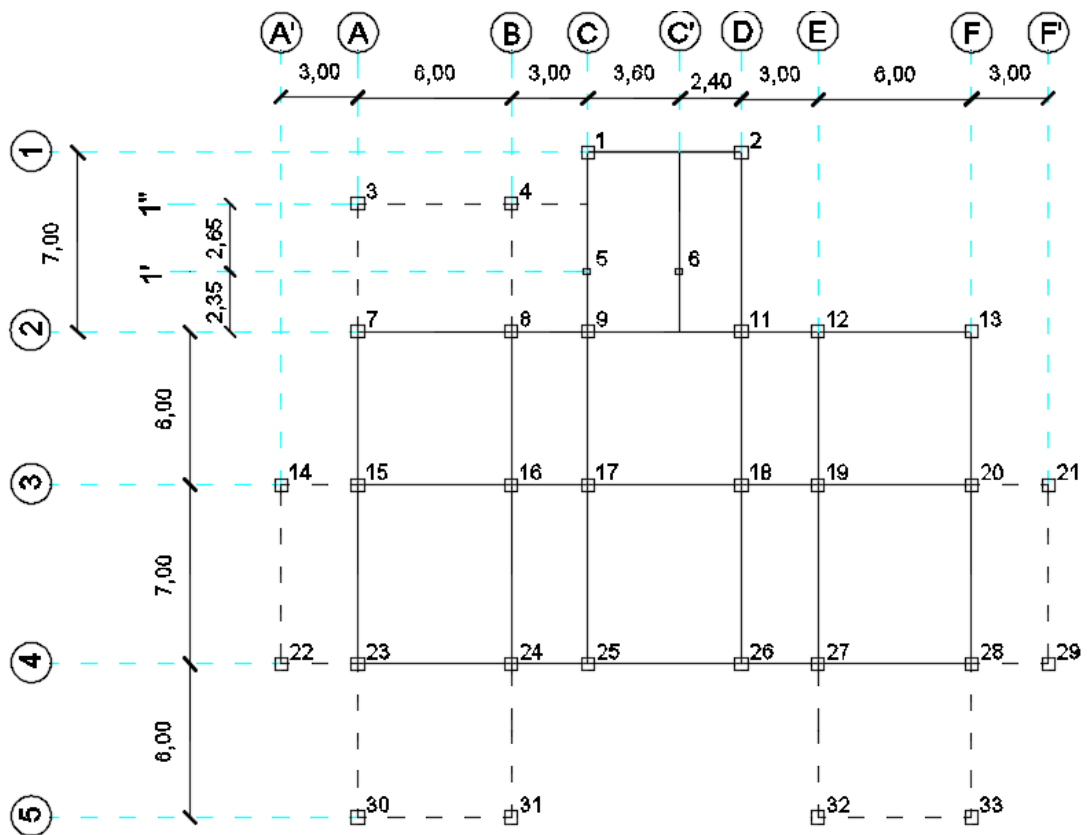


Figura 18, Esquema de Planta de cimentación edificio Bco. Central, línea entrecortada negra representa cadenas, unidad de medida (m).

- Debido a la condición irregular en planta y elevación, se tomó en cuenta diferentes planos en planta, como son el de mezzanine que se muestra en la foto 2, esquematizado en la figura 19 y el plano perteneciente al primer piso mostrado en la foto 3 representado en la figura 20, teniendo el segundo piso y los pisos restantes una forma igual a la del primer piso.

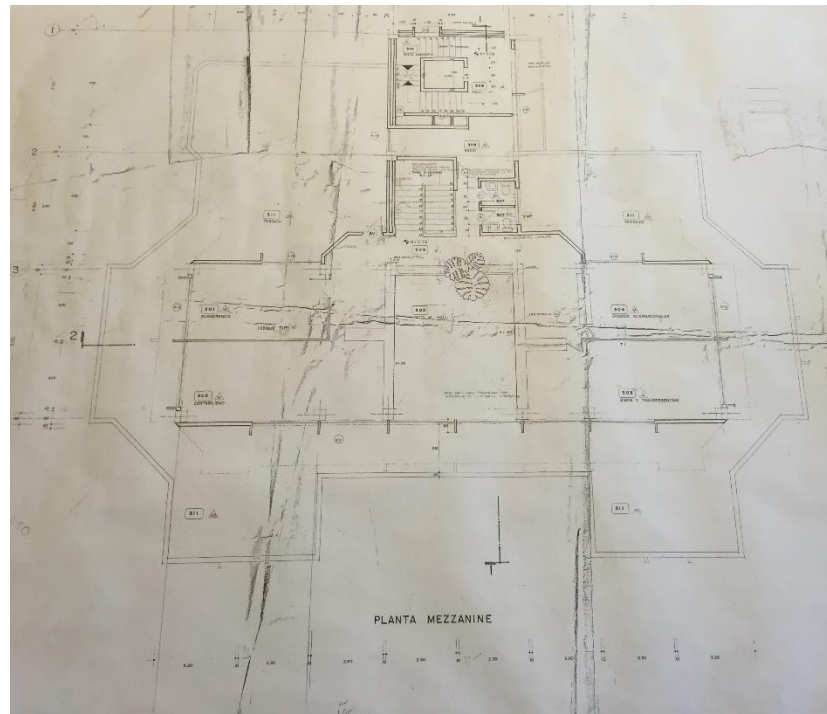


Foto 2, Planta Mezzanine, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta

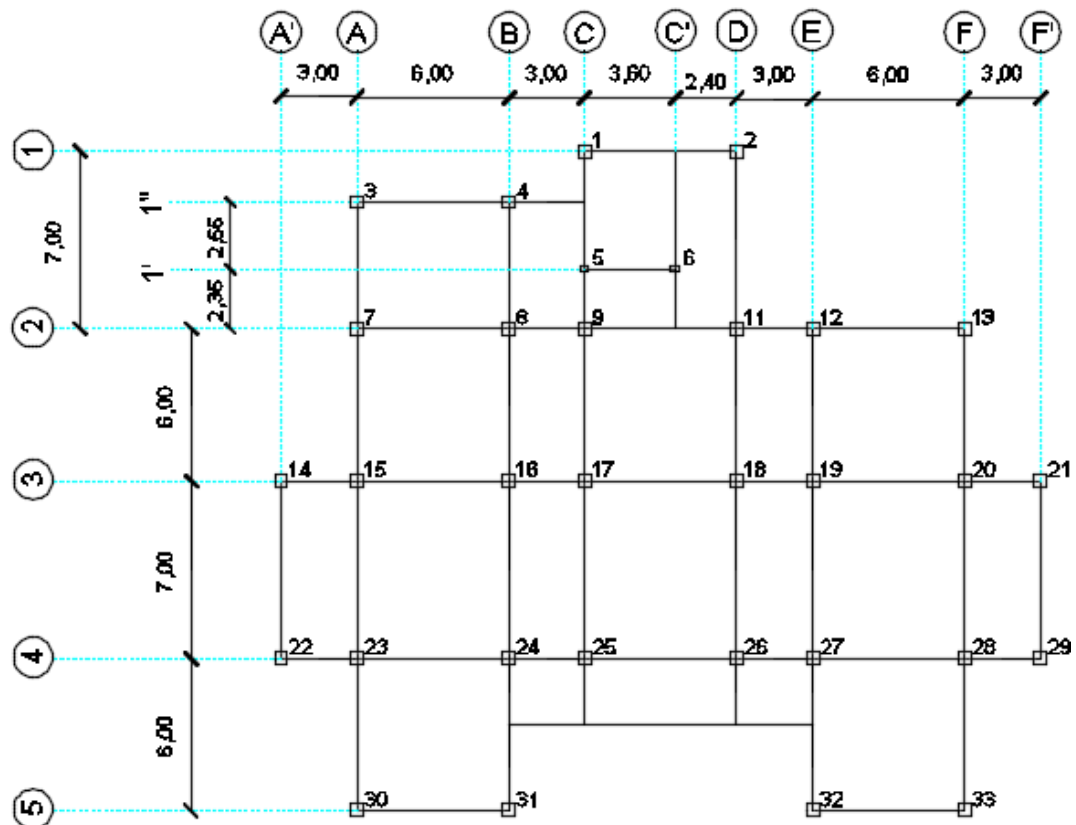


Figura 19, Esquema planta de Mezzanine, unidad (m)

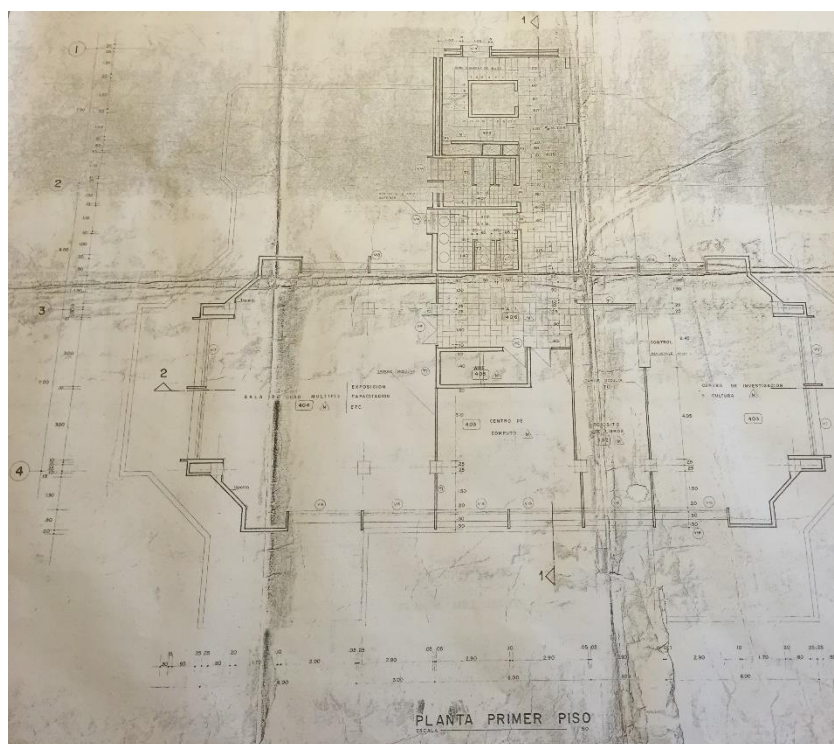


Foto 3, Planta Primer Piso, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta

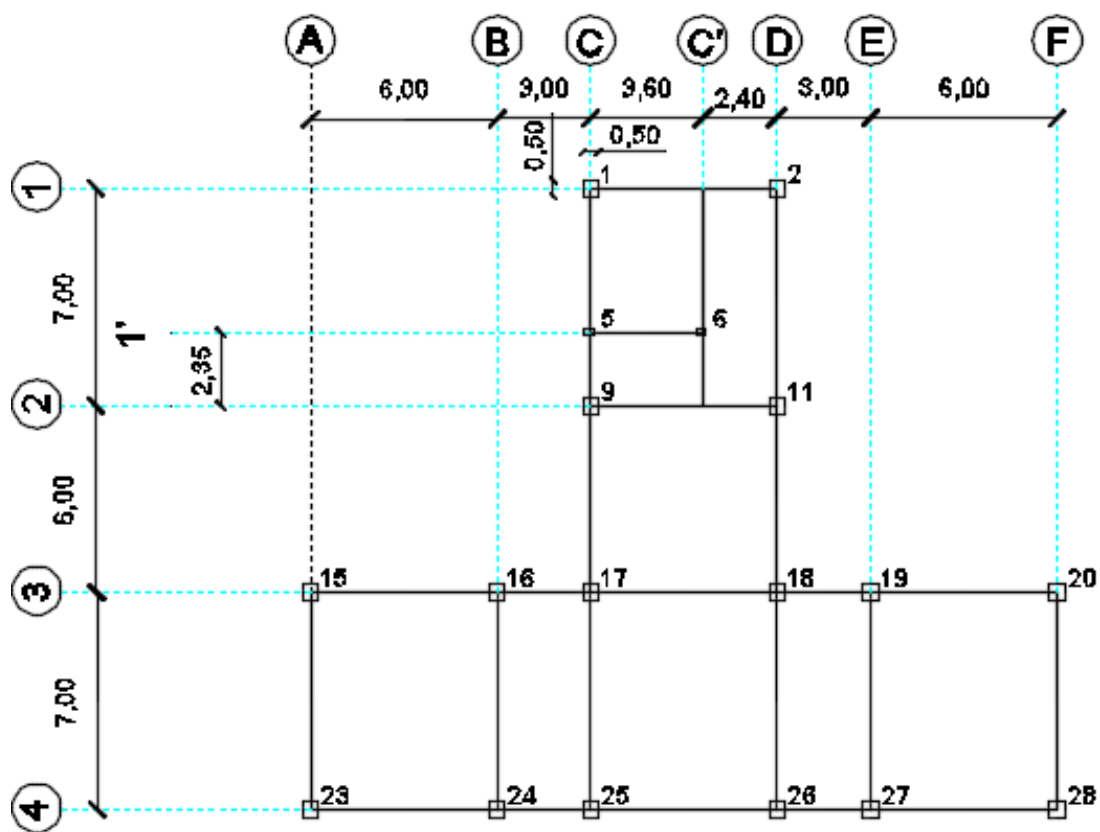


Figura 20, Esquema planta primer piso, Edf Bco. Central, Manta, Jipijapa, unidades (m).



- Se definen los tipos de columnas existentes en el modelo, su configuración en cuanto a refuerzo de acero y elevación, esto en base al plano mostrado en la foto 4 y a su esquematización que se muestra en las figuras 21 y 22.

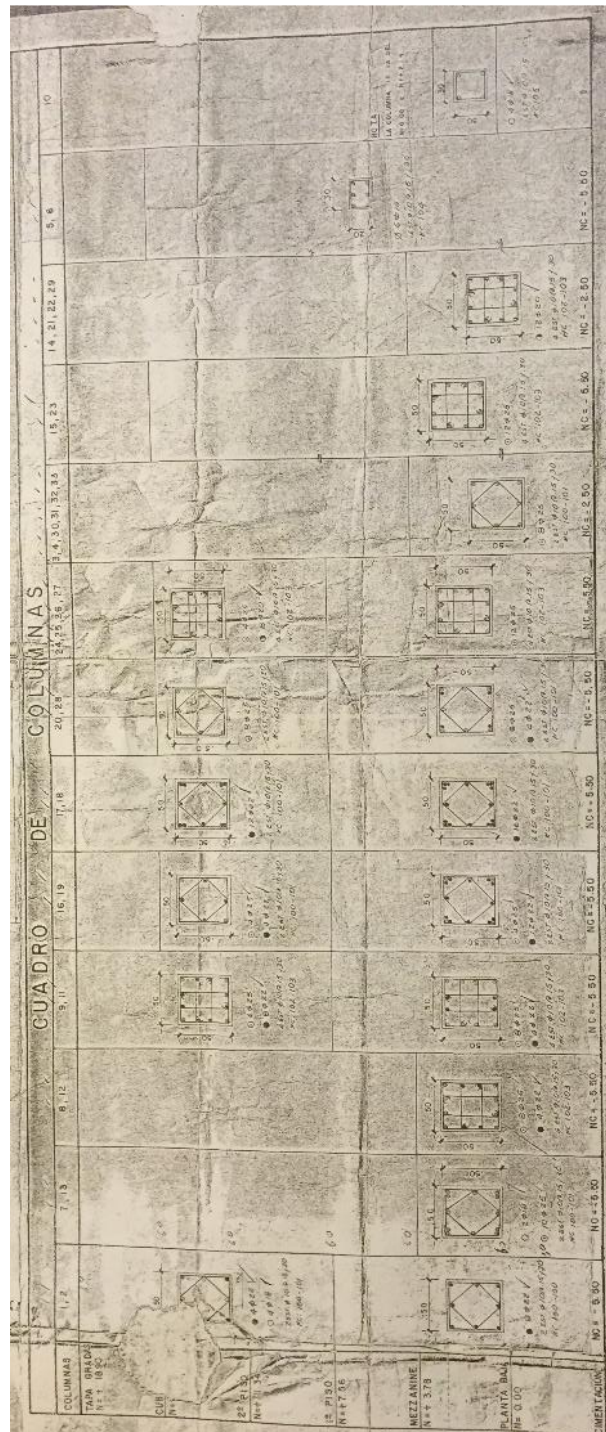


Foto 4, Cuadro de Columnas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta

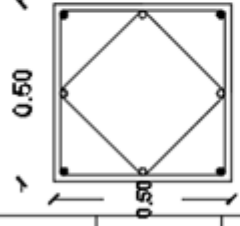
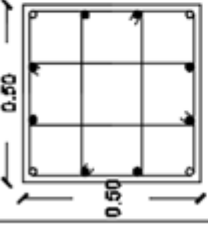
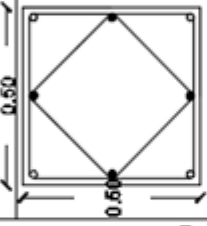
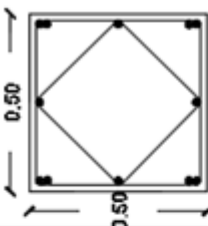
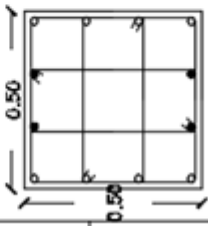
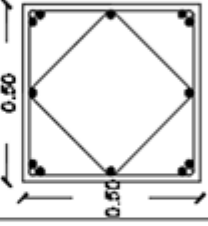
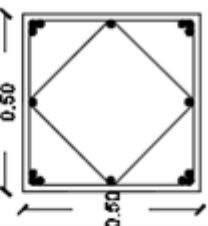
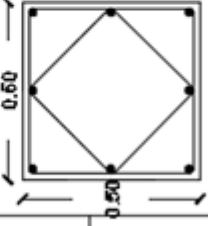
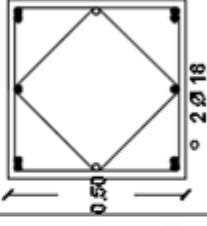
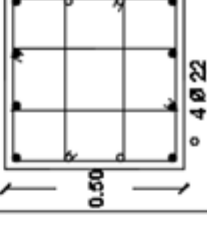
	1, 2	7, 13	8, 12	9, 11	10, 19	17, 18
COLUMNAS TAPA GRADAS N = +18.90						
CUBERTA N = +16.12						
2do PISO N = +11.34						
1er PISO N = +7.56						
MEZZANINE N = +3.76						
PLANTA BAJA N = 0.00						
CIMENTACIÓN	NC = - 5.50	NC = - 5.50	NC = - 5.50	NC = - 5.50	NC = - 5.50	NC = - 5.50

Figura 21, Esquema Cuadro de Columnas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta, unidades (m).



COLUMNAS TAPA GRADAS N = +18.90	20, 28	24, 25, 26, 27	3, 4, 30, 31, 32, 33	15, 23	14, 21, 22, 29	5, 6	10
CUBIERTA N = +15.12							
2da PISO N = +11.34							
1er PISO N = +7.56							
MEZZANINE N = +3.78							
PLANTA BAJA N = 0.00							
CIMENTACIÓN	NC = -5.50	NC = -5.50	NC = -2.50	NC = -5.50	NC = -2.50	NC = -5.50	NC = -5.50

NOTA:  
LA COLUMNA 10 VA DEL  
N 0.00 a N = +2.14

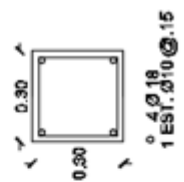


Figura 22, Esquema Cuadro de Columnas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta, unidades (m).

- La configuración de vigas del modelo, así como su posición, se tomó del plano de vigas, mostrado en la foto 5 esquematizado en la figura 23.



Foto 5, Plano de Vigas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta

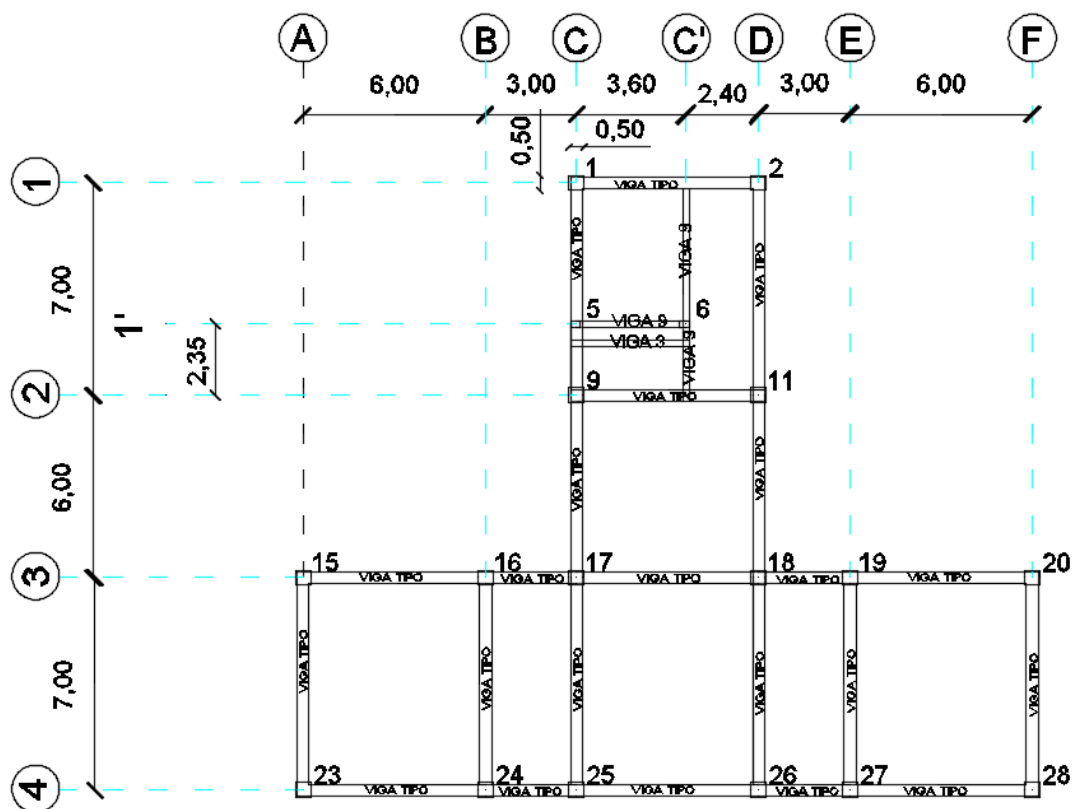


Figura 23, Esquema de plano de vigas, edificio BNC CENTRAL, Jipijapa, Manta.

En la figura 24 se muestra las configuraciones de vigas utilizadas en el modelo.

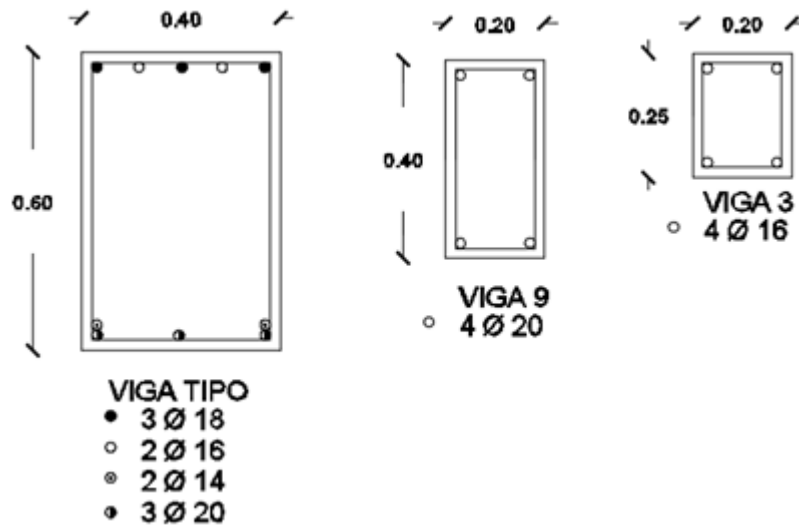


Figura 24, Configuración de vigas utilizadas en el modelo.

- Una vez obtenido los parámetros anteriores, se utilizará el programa SAP2000 para realizar la configuración o modelación de la estructura.
- Posterior a la colocación de Nuevo modelo en el programa, se ingresa los espaciamientos de ejes, tanto en planta como en elevación para definir la forma de la estructura, esto se realizó como se muestra en la figura 25, en este caso se tomaron en cuenta los dos niveles de cimentación, así como el nivel de subsuelo que existía en la edificación y se los representa para observar su comportamiento.

**Define Grid System Data**

**Edit**   **Format**

**System Name** GLOBAL   **Units** Tonf, m, C

**Grid Lines** Quick Start...

**X Grid Data**

	Grid ID	Spacing	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	A'	3.55	Primary	Show	End	
2	A	6	Primary	Show	End	
3	B	3	Primary	Show	End	
4	C	3.65	Primary	Show	End	
5	C'	2.35	Primary	Show	End	
6	D	3	Primary	Show	End	
7	E	6	Primary	Show	End	
8	F	3.5	Primary	Show	End	

**Y Grid Data**

	Grid ID	Spacing	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	5	6	Primary	Show	Start	
2	4	7	Primary	Show	Start	
3	3	6	Primary	Show	Start	
4	2	2.35	Primary	Show	Start	
5	1"	2.65	Primary	Show	Start	
6	1'	2	Primary	Show	Start	
7	1	0	Primary	Show	Start	
8						

**Z Grid Data**

	Grid ID	Spacing	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
3	NC 2	2.5	Primary	Show	End	
4	PB 0.00	2.14	Primary	Show	End	
5	Z4	1.64	Primary	Show	End	
6	MEZZ. +3.76	3.78	Primary	Show	End	
7	1ER +7.56	3.78	Primary	Show	End	
8	2DO +11.35	3.78	Primary	Show	End	
9	CUBIERTA	3.78	Primary	Show	End	
10	APA GRAD	0	Primary	Show	End	

**Display Grids as:**  
☐ Ordinates   ☒ Spacing

☐ Hide All Grid Lines  
☐ Glue to Grid Lines

**Bubble Size** 2.4384

Reset to Default Color   Reorder Ordinates

OK   Cancel

Figura 25, Espaciamento de Ejes, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Una vez realizado lo anterior, se definirá el material a utilizar, en este caso hormigón armado con una resistencia de 210 (kg/cm<sup>2</sup>), configurando sus características como se indica en la figura 26 a continuación; se tomó en consideración para el módulo de elasticidad del hormigón un valor de  $E = 14000 * \text{SQR}(210)$  (kg/cm<sup>2</sup>), el cual puede entregar una condición más real de la estructura, ya que es común la pérdida de resistencia por ciertos factores.

The image shows a 'Material Property Data' dialog box with the following sections and values:

- General Data**
  - Material Name and Display Color: FC 210 (with a cyan color swatch)
  - Material Type: Concrete (dropdown menu)
  - Material Notes: Modify/Show Notes... (button)
- Weight and Mass**
  - Weight per Unit Volume: 2.400E-03
  - Mass per Unit Volume: 2.447E-06
- Units**
  - Units: Kgf, cm, C (dropdown menu)
- Isotropic Property Data**
  - Modulus of Elasticity, E: 202879.27
  - Poisson's Ratio, U: 0.2
  - Coefficient of Thermal Expansion, A: 9.900E-06
  - Shear Modulus, G: 84533.03
- Other Properties for Concrete Materials**
  - Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 210
  - ☐ Lightweight Concrete
    - Shear Strength Reduction Factor: (empty text box)
- Switch To Advanced Property Display**
  - ☐ Switch To Advanced Property Display

At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 26, Propiedad de Material, hormigón, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

En cuanto al acero a utilizar se escogió un material de grado 60, que tiene las características mostradas a continuación en la figura 27.

**Material Property Data**

**General Data**

Material Name and Display Color: ACERO G60

Material Type: Rebar

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Weight and Mass**

Weight per Unit Volume: 7.849E-03

Mass per Unit Volume: 8.004E-06

**Units**

Kgf, cm, C

**Uniaxial Property Data**

Modulus of Elasticity, E: 2038901.9

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 784193

**Other Properties for Rebar Materials**

Minimum Yield Stress, Fy: 4218.4178

Minimum Tensile Stress, Fu: 6327.6266

Expected Yield Stress, Fye: 4640.2595

Expected Tensile Stress, Fue: 6960.3893

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 27, Propiedad de Material, acero refuerzo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Una vez definido el material, se establece las configuraciones en lo referente al refuerzo de acero de los elementos estructurales, para lo que utilizaremos la herramienta de *SECTION DESIGNER*, disponible en SAP2000.

Definiendo así secciones de columnas y vigas, mostradas anteriormente en planos, como ejemplo se muestra en las figuras 28 y 29 las configuraciones de la columna (número: 17 y 18) y de la viga (40x60) respectivamente.

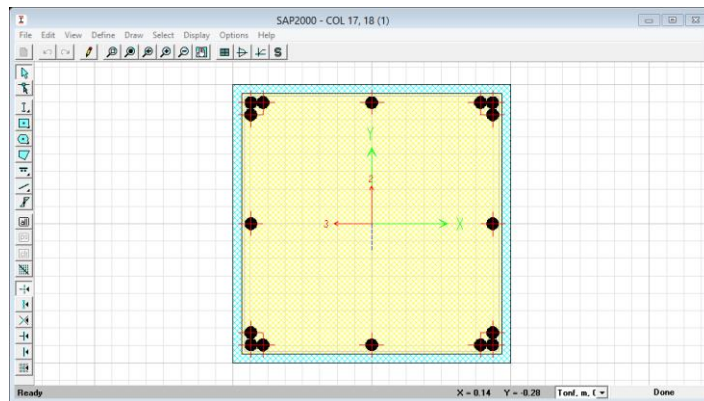


Figura 28, Configuración de refuerzo columna, Section Designer, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

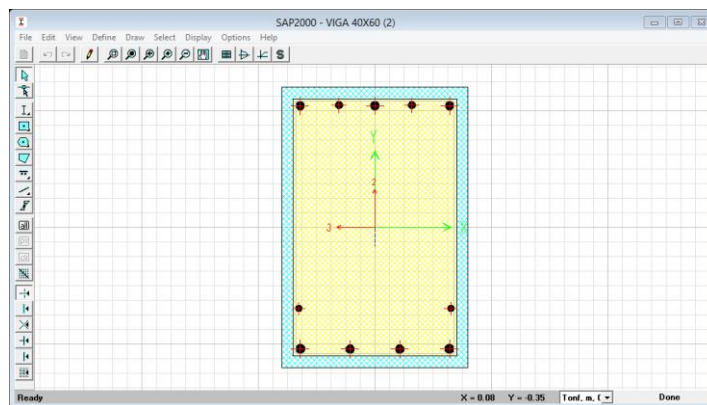


Figura 29, Configuración de refuerzo viga, Section Designer, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Como siguiente paso se asignarán las columnas y vigas definidas para obtener el modelo mostrado en la figura 30.

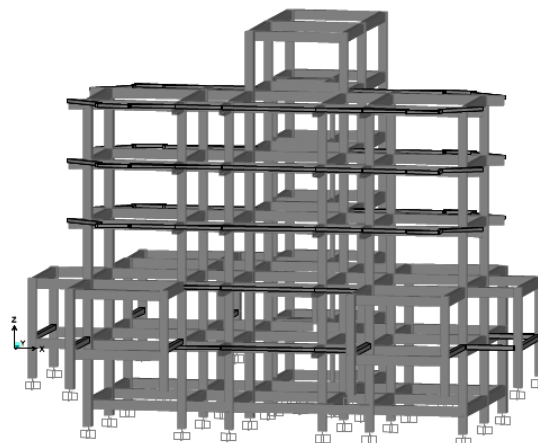


Figura 30, Modelo asignado vigas y columnas, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Se continúa con la creación del elemento losa, para lo cual se debe tomar en cuenta que en el software únicamente existe la posibilidad de la utilización de una losa maciza, por esta razón, considerando que la losa real es alivianada con bloque de una altura de 25 cm, se obtuvo una altura equivalente de 18.06 cm de losa maciza, previo a la igualación de inercias entre estos dos tipos de losa. Ver figura 31.

Shell Section Data

**Section Name** LOSA TIPO SHELL -THIN  
Section Notes   
Display Color

Type  
☒ Shell - Thin  
☐ Shell - Thick  
☐ Plate - Thin  
☐ Plate Thick  
☐ Membrane  
☐ Shell - Layered/Nonlinear

Material  
Material Name  FC 210  
Material Angle 0.

Thickness  
Membrane 0.1806  
Bending 0.1806

Concrete Shell Section Design Parameters

Stiffness Modifiers   
Temp Dependent Properties

Figura 31, Definición de características de losa, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

Colocadas las losas y cargas en ellas, queda el modelo como se muestra a continuación en la figura 32.



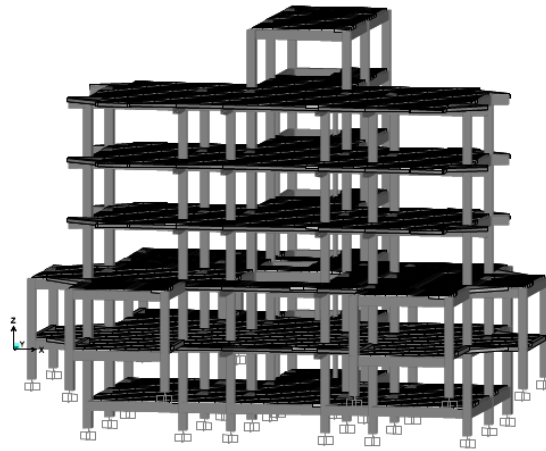


Figura 32, Modelo estructural incluido losa, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Luego se colocan muros en la planta de subsuelo, para obtener un comportamiento rígido, evitando que esto afecte en la forma y modos de vibración de la estructura; buscando también una configuración real, se define las características y comportamiento del muro de subsuelo como se muestra en la figura 33.

**Shell Section Data**

**Section Name** Muro subsuelo .30  
 Section Notes Modify/Show...  
 Display Color ■

**Type**  
☐ Shell - Thin  
☐ Shell - Thick  
☐ Plate - Thin  
☐ Plate Thick  
☒ Membrane  
☐ Shell - Layered/Nonlinear  
 Modify/Show Layer Definition...

**Material**  
 Material Name + FC 210  
 Material Angle 0.

**Thickness**  
 Membrane 0.3  
 Bending 0.3

**Concrete Shell Section Design Parameters**  
 Modify/Show Shell Design Parameters...

**Stiffness Modifiers** **Temp Dependent Properties**  
 Set Modifiers... Thermal Properties...

OK Cancel

Figura 33, Definición Características muro subsuelo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

Colocamos también en el modelo muros de corte existentes en gradas posteriores, ver figura 34 la cual contiene las características y comportamiento de dicho muro.

**Shell Section Data**

**Section Name** MURO GRADAS

Section Notes

Display Color ☒

Type

☒ Shell - Thin

☐ Shell - Thick

☐ Plate - Thin

☐ Plate Thick

☐ Membrane

☐ Shell - Layered/Nonlinear

Material

Material Name  FC 210

Material Angle 0.

Thickness

Membrane 0.2

Bending 0.2

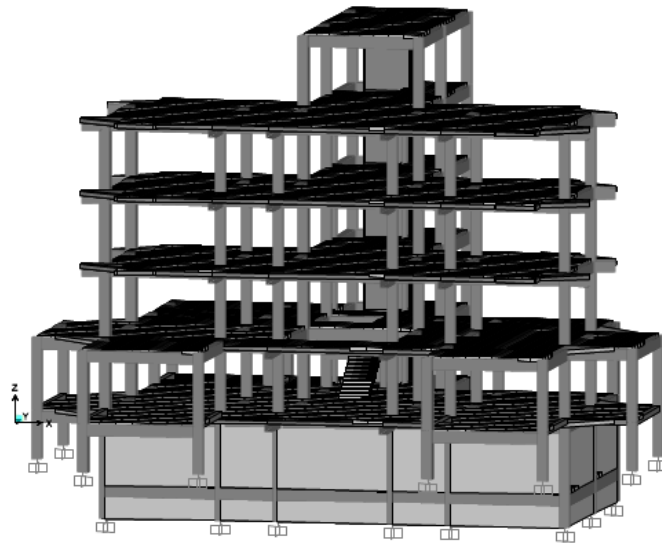
Concrete Shell Section Design Parameters

Stiffness Modifiers

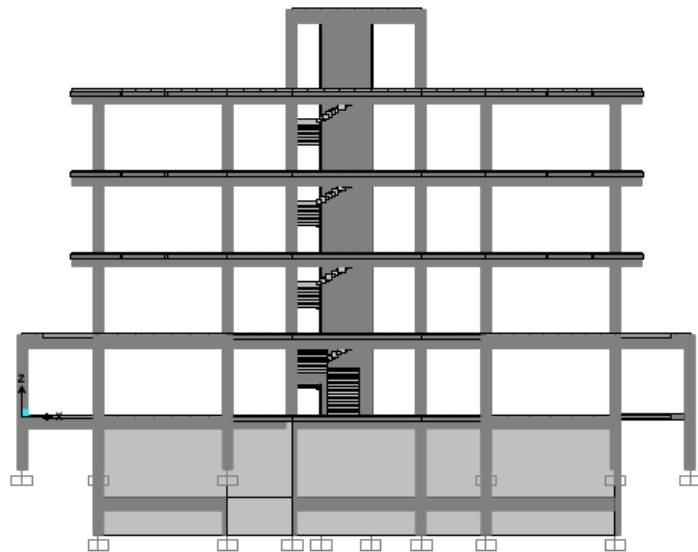
Temp Dependent Properties

*Figura 34, Configuración de diafragma gradas posteriores, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL*

Una vez definidas las características y las secciones de muro, se procede a graficarlos en el modelo, obteniendo la estructura como se muestra en la figura 35 y 36, en donde se puede observar los muros de corte o diafragmas y los muros de subsuelo.



*Figura 35, Modelo estructural incluido muros de corte y subsuelo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL*



*Figura 36, Modelo estructural incluido muros de corte y subsuelo, vista frontal, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL*

- Una vez terminada la esquematización de la estructura en el programa, se procede a configurar las condiciones en las que se encuentra la estructura.

Se aplicará las cargas mostradas en la figura 37 a la losa, basándose en las normas NEC, en su capítulo de cargas no sísmicas; se escogió los valores de,  $0.3 \text{ t/m}^2$  como una carga muerta adicional o de paredes más instalaciones y una carga viva de oficinas de  $0.24 \text{ t/m}^2$ . (CAMICON & MIDUVI, 2015a)

Load Pattern	CM ADICIONAL
Uniform Load	
Coordinate System	GLOBAL
Load Direction	Gravity
Force/Area	0.3
Load Pattern	CV
Uniform Load	
Coordinate System	GLOBAL
Load Direction	Gravity
Force/Area	0.24

Figura 37, Cargas aplicadas en modelo, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Para considerar un comportamiento sísmico se propone hacer un análisis tiempo historia, no lineal, para esto se ingresó el registro de aceleraciones del terremoto de 16 de abril, correspondiente a la zona de Portoviejo, en dirección norte, el cual tiene la mayor aceleración con respecto al este, se ingresa el registro, el cual ha sido disminuido a 40 segundos para una mayor facilidad computacional, como se indica en la figura 38 y 39.

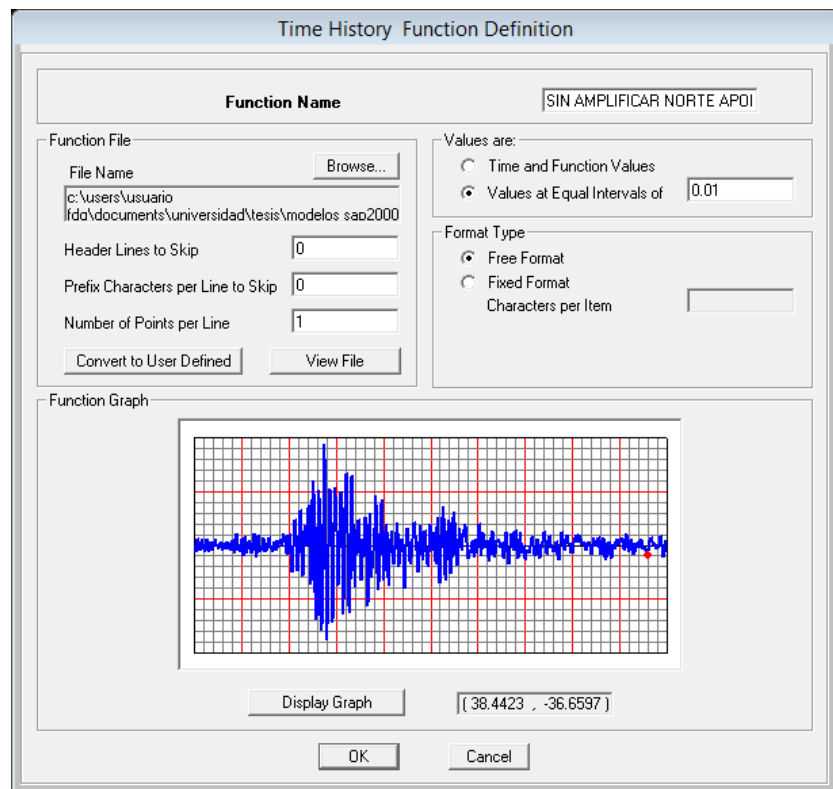


Figura 38, Registro de aceleraciones, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

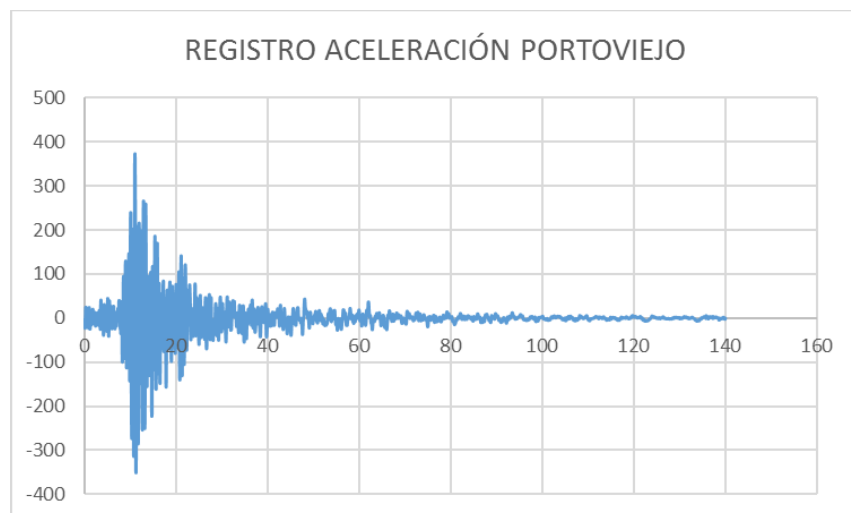


Figura 39, Registro de aceleraciones, Norte, Portoviejo

- Con el registro antes ingresado se creó un caso de carga, en donde se define el tipo de análisis a realizar, así como el tipo de caso de carga, se puede observar en la figura 40 que el caso de carga seleccionado es

TIME HISTORY, con un análisis NO LINEAL-INTEGRACIÓN DIRECTA, también podemos observar que se ingresa el registro de aceleraciones dentro del caso de carga.

**Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History**

Load Case Name:   

Notes: 

Load Case Type:  

**Initial Conditions**

☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☐ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

**Modal Load Case**

Use Modes from Case:

**Analysis Type**

☐ Linear

☒ Nonlinear

**Solution Type**

☐ Modal

☒ Direct Integration

**Geometric Nonlinearity Parameters**

☒ None

☐ P-Delta

☐ P-Delta plus Large Displacements

**Loads Applied**

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	SIN AMPLIF	0.01
Accel	U1	SIN AMPLIFICA	0.01

☐ Show Advanced Load Parameters

**Time Step Data**

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size:

**History Type**

☒ Transient

☐ Periodic

**Mass Source**

**Other Parameters**

Damping:  

Time Integration:  

Nonlinear Parameters:

Figura 40, Caso de carga TIME-HISTORY, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Un paso adicional, para obtener el comportamiento de la estructura en el rango no lineal, es la colocación de las rótulas plásticas o hinges, en vigas y columnas, las cuales dependerán de la cantidad y posición de acero de cada elemento.

En el software SAP2000 existen dos posibilidades de definir rótulas plásticas, de manera manual o automática; en esta tesis se ingresarán hinged automáticas, en las que posterior a la selección de los elementos requeridos, sean estos vigas o columnas, se ingresará la distancia relativa en la que se encontrará la rótula plástica, con respecto al nudo del pórtico, ver figura 41, esta distancia relativa se obtiene de la relación entre la distancia física en la que se encuentra la rótula con la longitud total del elemento.

La distancia en la que generalmente se encuentra la rótula es igual a la altura de la sección del elemento. (Computers and Structures Inc., 2015)

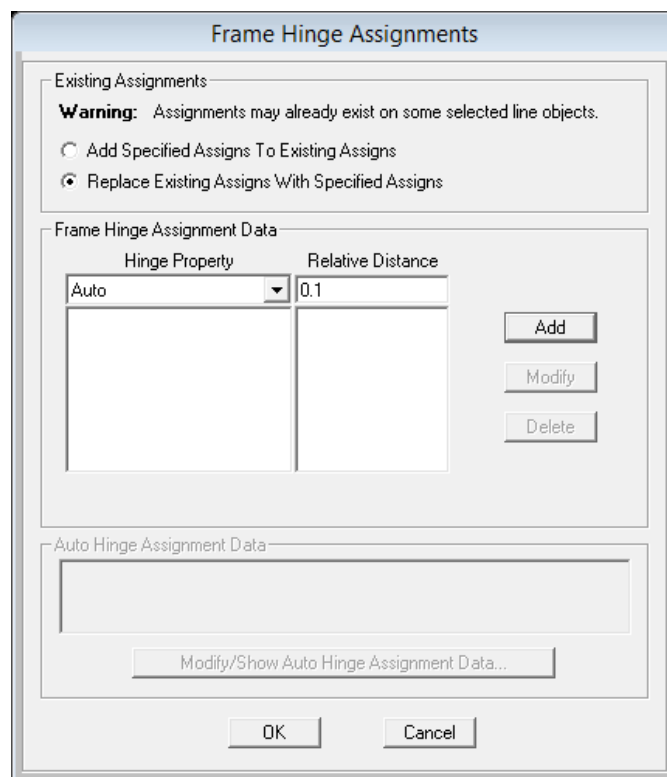


Figura 41, Ingreso de Hinges, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

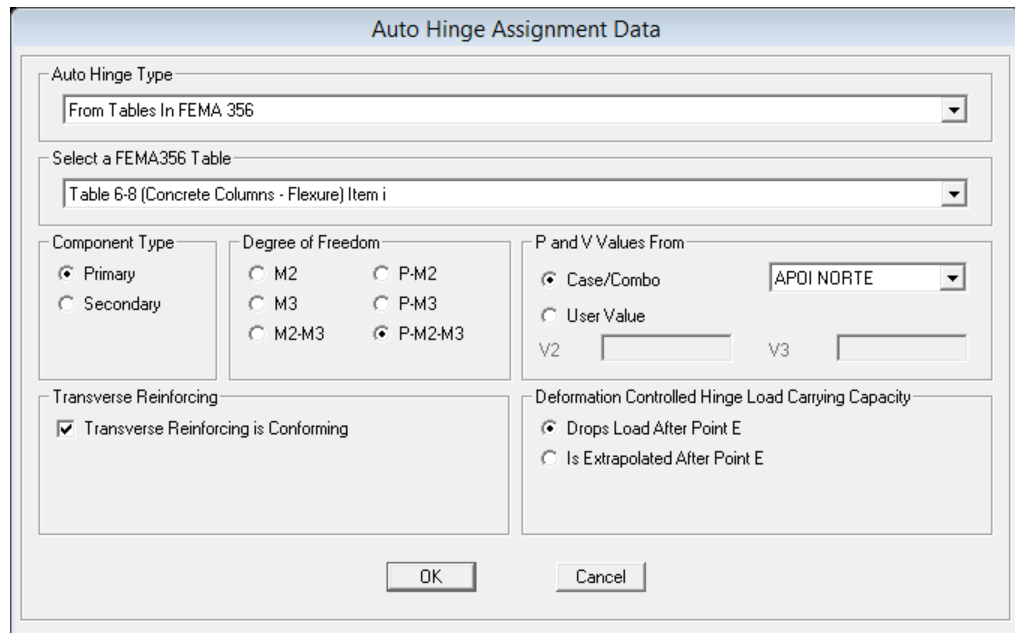
Como se puede observar en la figura 42, en el caso de vigas, su comportamiento no lineal se basa en la norma FEMA 356 mostradas en el anexo 1; se tomará en consideración que la carga que definirá su comportamiento es de tipo vertical, por lo que se ha creado una envolvente que posee todas las cargas verticales que actúan sobre la viga en consideración.

Figura 42, Definición de hinged en vigas, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

En el caso de columnas, se observa en la figura 43 que su comportamiento igualmente no lineal se basa en la norma FEMA 356 mostrada en el anexo 2; se tomará en consideración que la carga que



definirá su comportamiento es de tipo horizontal por lo que se toma el caso de carga tiempo historia antes ingresado.



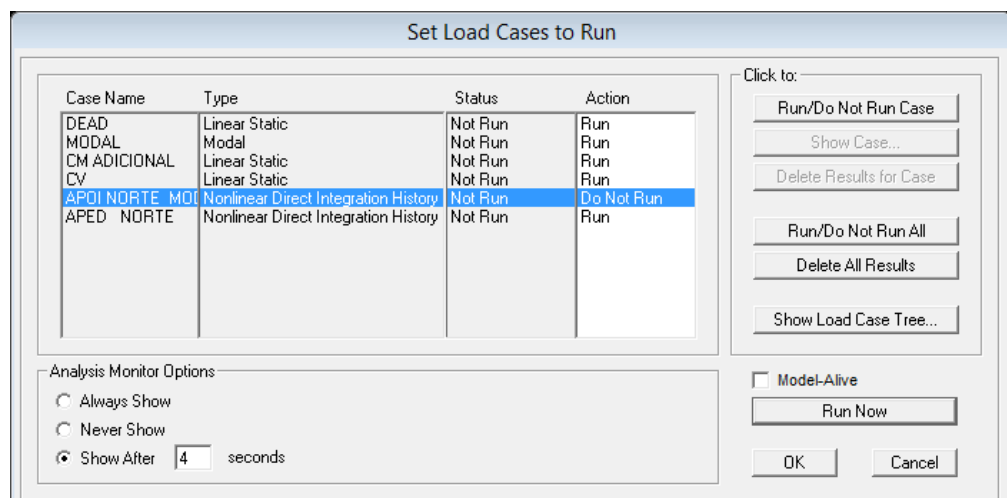
The dialog box 'Auto Hinge Assignment Data' contains the following settings:

- Auto Hinge Type:** From Tables In FEMA 356
- Select a FEMA356 Table:** Table 6-8 (Concrete Columns - Flexure) Item i
- Component Type:** Primary (selected), Secondary
- Degree of Freedom:** M2, M3, M2-M3, P-M2, P-M3, P-M2-M3 (selected)
- P and V Values From:** Case/Combo (selected), User Value. APOI NORTE is selected in the dropdown. V2 and V3 input fields are empty.
- Transverse Reinforcing:** Transverse Reinforcing is Conforming (checked)
- Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity:** Drops Load After Point E (selected), Is Extrapolated After Point E

Buttons: OK, Cancel

Figura 43, Definición de hings en columnas, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

- Una vez concluidos estos pasos se correrá el programa para obtener los resultados, ver figura 44.



The dialog box 'Set Load Cases to Run' displays a table of load cases and their status.

Case Name	Type	Status	Action
DEAD	Linear Static	Not Run	Run
MODAL	Modal	Not Run	Run
CM ADICIONAL	Linear Static	Not Run	Run
CV	Linear Static	Not Run	Run
APOI NORTE MOD	Nonlinear Direct Integration History	Not Run	Do Not Run
APED NORTE	Nonlinear Direct Integration History	Not Run	Run

**Click to:**

- Run/Do Not Run Case
- Show Case...
- Delete Results for Case
- Run/Do Not Run All
- Delete All Results
- Show Load Case Tree...

**Analysis Monitor Options:**

- Always Show
- Never Show
- Show After 4 seconds

**Model-Alive:** Run Now

Buttons: OK, Cancel

Figura 44, Corrida de programa, SAP2000. Edificio BNC CENTRAL.

#### 4.2. Diseño de la estructura con disipadores de energía.

Para una comparación entre el modelo estructural sin disipación mencionado anteriormente y los modelos estructurales con disipación de energía a describir, se añadirán disipadores friccionales a la estructura modelada, estos disipadores se instalarán en tres configuraciones o acoples los cuales son:

- Disipador acoplado en diagonal.
- Disipador acoplado con mecanismos de amplificación de desplazamientos.

*(Toggle-Brace system y Eccentric Lever-Arm system “ELAS”)*

Para modelar los disipadores en el software SAP2000 se crea un elemento LINK, como se muestra en la figura 45, en donde entre sus características se elegirá que sea de tipo PLASTIC (WEN), simulando las características de un disipador friccional a utilizar en esta tesis, ya que tendrá un comportamiento histerético similar a un disipador friccional como se muestra en la figura 46.

Figura 45, Disipador como elemento link, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

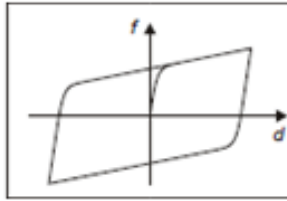


Figura 46, Comportamiento Histerético, Wen, SAP2000.(Computers and Structures Inc., 2015)

Escogido una vez el tipo de disipador, se procede a configurarlo mediante la introducción de sus propiedades, como se muestra en la figura 47.

Link/Support Directional Properties	
<b>Identification</b>	
Property Name	DISIPADOR
Direction	U1
Type	Plastic (Wen)
NonLinear	Yes
<b>Properties Used For Linear Analysis Cases</b>	
Effective Stiffness	234769.
Effective Damping	0.
<b>Properties Used For Nonlinear Analysis Cases</b>	
Stiffness	234769.
Yield Strength	60.
Post Yield Stiffness Ratio	1.000E-04
Yielding Exponent	20.
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Figura 47, Propiedades de elemento link, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL

Entre las principales propiedades se tiene,

- Rigidez lineal/no lineal: Es igual a la rigidez axial de los elementos conectores. (QuakeTek, 2016)
- Yield Strenght/Fuerza de plastificación: fuerza o capacidad del disipador friccional, mediante la cual disipará energía.

- Post Yield Stiffness Ratio/Relación de plastificación: Se recomienda que se encuentre en el valor de 0.0001. (QuakeTek, 2016) (Computers and Structures Inc., 2015)
- Yielding Exponent/Exponente de plastificación: Indica que tan brusco es el cambio de comportamiento elástico a inelástico, tiene valores entre (0-20). (Computers and Structures Inc., 2015)(QuakeTek, 2016)

Se plantea entonces en primer lugar realizar un análisis aplicando disipadores de energía, los cuales en sus propiedades incluirán una rigidez infinita para obtener condiciones ideales, en donde se comparará las fuerzas requeridas en cada sistema, así como las derivas obtenidas en cada modelo con la aplicación de su respectivo sistema de acople.

Para el otro análisis se reducirá la rigidez hasta tener derivas aceptables, teniendo así una rigidez real mediante la cual se puede obtener las dimensiones de los elementos requeridos, ya que corresponde a la rigidez axial de los elementos de acople, este análisis se realizará en la parte económica de ésta tesis considerando condiciones reales.

Para el primer análisis con condiciones ideales mencionado se estableció que la rigidez tomada será igual a una rigidez infinita, la cual basta con que sea igual a 100 veces la mayor rigidez del modelo, esto, buscando que cada mecanismo de configuración se comporte idealmente para poder tener una comparación entre los demás sistemas, se toma esta consideración ya que se

espera un comportamiento lineal de los elementos conectores entre disipador y estructura, por lo que estos elementos deben tener una rigidez grande; la fuerza de plastificación será tomada de acuerdo a la mayor cantidad de energía disipada, la rigidez infinita ingresada es igual a 234769 t/m y la fuerza de plastificación es igual a 60 toneladas.

La rigidez infinita mencionada anteriormente se la obtiene considerando como rigidez máxima del modelo la de una columna de 50x50, obteniendo los resultados mostrados a continuación:

$$k_{m\acute{a}x \text{ columna}} = \frac{12 E I}{L^3}$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{50 \text{ cm} * (50 \text{ cm})^3}{12} = 520,833.33 \text{ cm}^4$$

$$E = 14000 * \sqrt{f'c} = 14000 * \sqrt{210} = 202,879.27 \text{ kg/cm}^2$$

$$L = 3.78 \text{ m}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} k_{m\acute{a}x} &= \frac{12 E I}{L^3} = \frac{12 * 202,879.27 \text{ kg/cm}^2 * 520,833.33 \text{ cm}^4}{(378 \text{ cm})^3} \\ &= 23,476.98 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} = 2,347.69 \frac{\text{ton}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la rigidez infinita es igual a,

$$k_{infinita} = k_{m\acute{a}x} * 100 = 2347.69 \frac{\text{ton}}{\text{m}} * 100 = 234769.00 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$$

La relación de plastificación (post yield stiffness ratio) se recomienda que se encuentre en 0.0001 y el exponente de plastificación (yielding exponent) del cual depende que tan brusco sea el cambio de comportamiento elástico a inelástico se considera un valor de 20, el cual se encuentra entre (0-20), ver figura 48 en donde se observa que mientras mayor sea el exponente más marcado es el cambio de comportamiento lineal a no lineal. (Computers and Structures Inc., 2015)

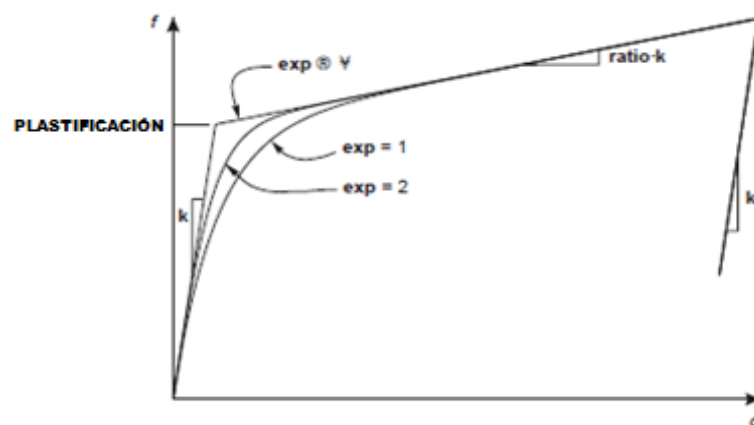


Figura 48, Comportamiento de elemento Wen en base a exponente, SAP2000.

#### 4.2.1. Diseño de una estructura con disipadores de energía en condiciones ideales, acoplados de una manera convencional (diagonal).

Se ha propuesto la utilización de disipadores de energía acoplados con una configuración comúnmente usada que es en diagonal, esto para comparar con las ventajas si existieren, que representan los mecanismos de amplificación de desplazamientos.

Para instalar los disipadores en el modelo se seguirá los siguientes pasos mostrados en la figura 49.

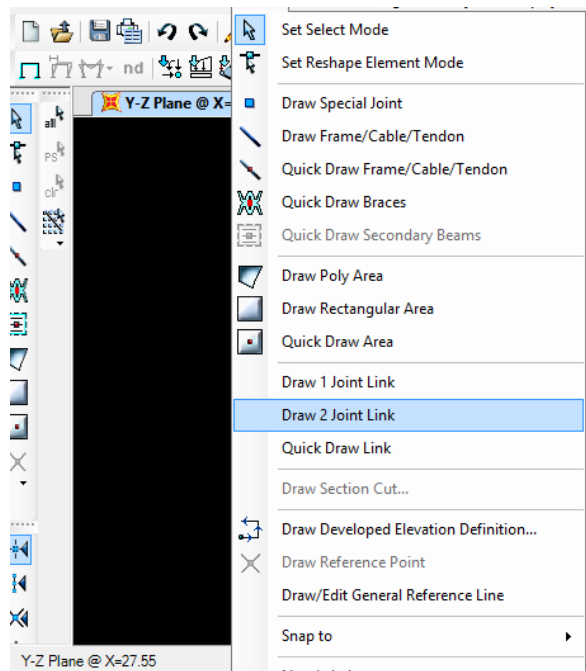


Figura 49, Comando para dibujar elemento link en SAP2000.

Quedando únicamente dibujar conectando los nudos requeridos, obteniendo un modelo como se muestra en la figura 50, esto se deberá realizar posterior a la creación del elemento link introduciendo las características desarrolladas en el anterior punto.

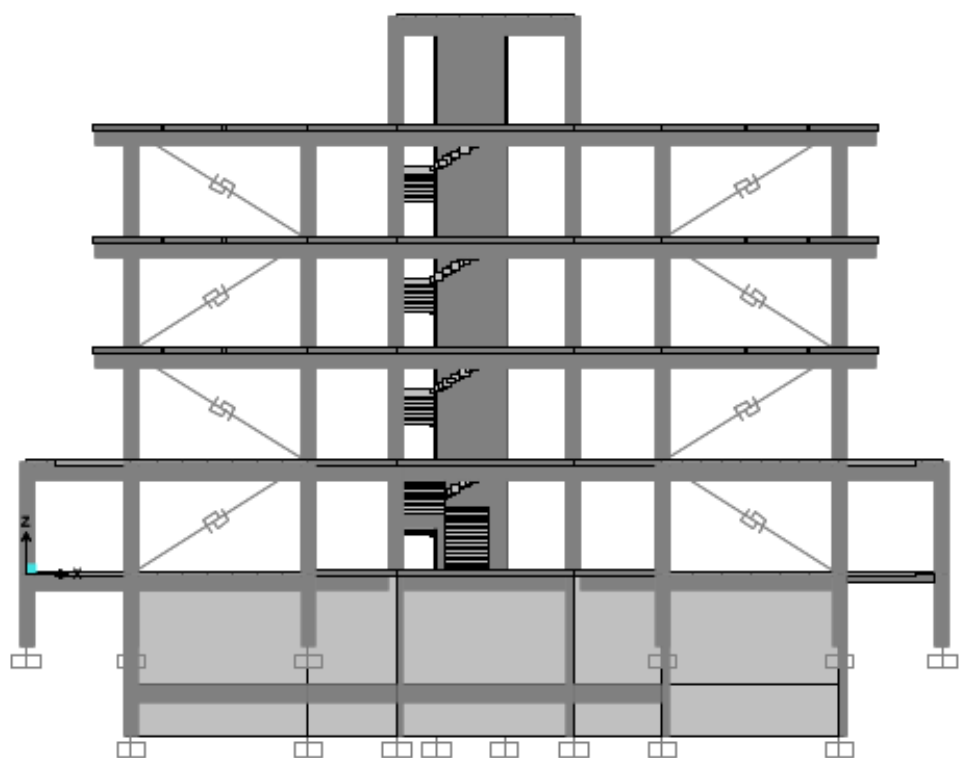


Figura 50, Modelo estructural con disipadores en configuración diagonal, SAP2000, Edificio BCO CENTRAL



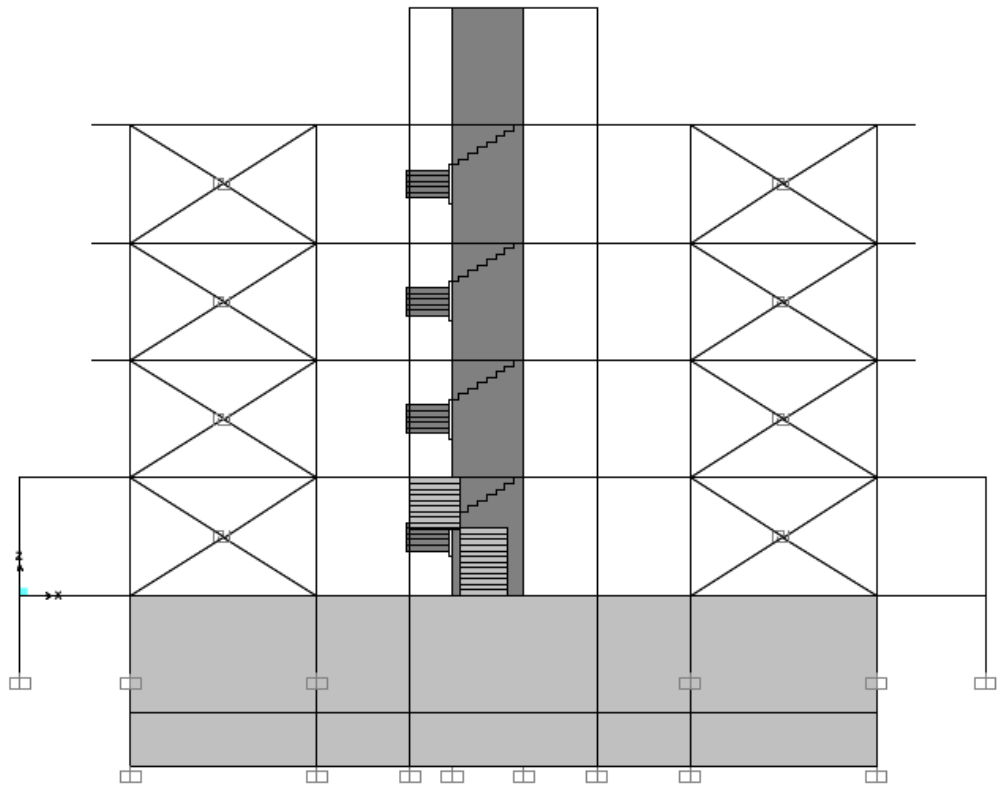
#### **4.2.2. Diseño de una estructura con disipadores de energía en condiciones ideales, acoplados con mecanismos de ampliación de desplazamientos “Toggle Brace System” y “Eccentric Lever Arm System (ELAS)”**

Se instalarán disipadores de energía friccionales en el modelo acoplados mediante dos configuraciones no convencionales que son toggle-brace system y Eccentric lever-arm system, los cuales amplifican los desplazamientos en el disipador, buscando comparar las ventajas entre ambos, así como también con la configuración de acople en diagonal mencionada anteriormente.

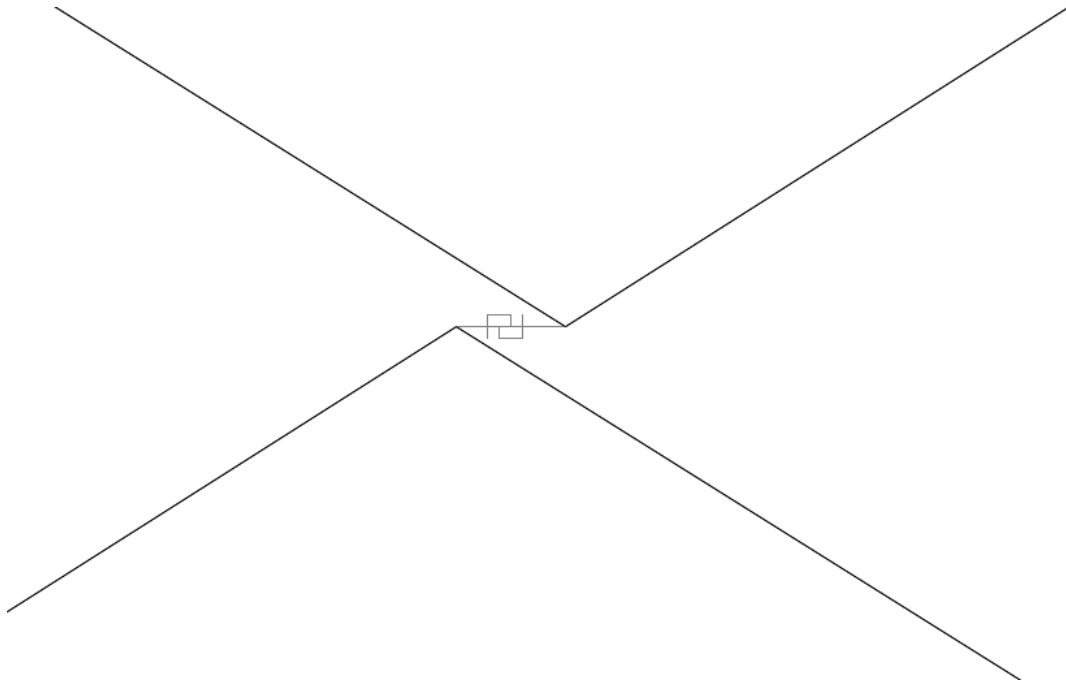
Con el fin de crear un modelo práctico y fácilmente computable, los disipadores friccionales acoplados a la estructura con los mecanismos de ampliación antes mencionados serán sustituidos por un acople tipo diagonal sin ampliación, diferenciándose este diseño del acople en diagonal propiamente dicho en que tendrá una configuración a base de diagonales rígidas conectadas por un elemento link (disipador) en sentido horizontal como se observa en la figura 51, esto hará que no exista ningún tipo de pérdida debido a la configuración horizontal del disipador, ver figura 52.

Así se ha propuesto entonces la utilización de una configuración de acople en diagonal que simule las características de un mecanismo de ampliación de desplazamientos, esto se lo hará mediante la obtención de una rigidez equivalente, la cual será utilizada al momento de realizar el diseño real de los elementos que conforman el mecanismo de ampliación, es decir cuando se

tome en consideración condiciones reales, siendo la rigidez equivalente igual a una rigidez introducida en el sistema mediante la cual tengamos derivas aceptables.



*Figura 51, Configuración tipo diagonal equivalente a mecanismos de amplificación de desplazamientos, SAP2000. Edificio BNC CENTRAL.*



*Figura 52, Elemento link en forma horizontal, conectando a diagonales. SAP2000, Edificio BCN CENTRAL*

Las características de estos disipadores incluirán también una rigidez infinita como se mencionó anteriormente, para una correcta comparación entre los modelos estructurales propuestos, ya que se estaría definiendo como una condición ideal.

La diferencia entre estos mecanismos (“ELAS” y “Toggle-brace”) y el anterior descrito consiste únicamente en las fuerzas requeridas de disipadores, teniendo estos mecanismos de amplificación una ventaja en la disminución de fuerzas requeridas en la misma magnitud que su factor de amplificación

## **CAPÍTULO V**

### **5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DISEÑO.**

Una vez realizado el análisis de la estructura en el software SAP2000 con los modelos mencionados anteriormente en el capítulo IV, se obtendrán resultados los cuales muestran en los siguientes literales.

#### **5.1. Análisis técnico de resultados en condiciones ideales (comportamiento óptimo de braces).**

Como resultados técnicos obtendremos derivas; cuadros de energía, en donde se podrá observar la participación de los disipadores de energía y cuadros de histéresis que desarrollarán dichos disipadores.

También se incluyen los resultados de las rótulas plásticas o hings aplicadas al modelo estructural previamente como se mencionó en el capítulo anterior, se definió automáticamente para cada hinge un diagrama de momento – curvatura según la norma FEMA 356, buscando entregar propiedades no lineales al elemento mediante la aplicación de hings, definiendo varios puntos en este diagrama como se muestra en la figura 53, donde, el punto A representa el origen, el punto B representa la plastificación del elemento, el punto C nos indica la capacidad última del elemento en análisis, el punto D muestra la capacidad por esfuerzo residual y como punto final E demuestra falla total.(Computers and Structures Inc., 2015)

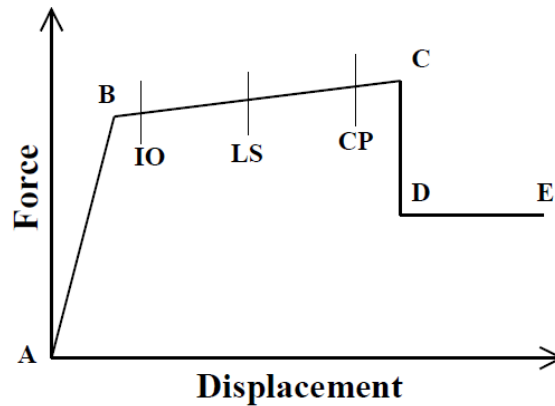


Figura 53, Diagrama Fuerza-Desplazamiento igual a Momento-Curvatura, SAP2000.

Se han definido medidas adicionales de deformación en los puntos, IO el cual representa ocupación inmediata, LS el cual indica seguridad de vida y CP el que nos indica la prevención de colapso, estas medidas no afectan en el comportamiento de la estructura, los cuales actúan como indicadores de seguridad.(Computers and Structures Inc., 2015)

#### 5.1.1. Resultados de una estructura sin mecanismo adicional de protección sísmica.

- En la figura 54, 55 y 56, se muestra el resultado post análisis de la estructura, pudiendo observar las rótulas plásticas formadas en columnas y vigas. Los colores de estas rótulas plásticas actúan como indicadores de la zona respectiva en la que se encuentra según se definió anteriormente, pudiendo observar que según el modelo estructural y las propiedades definidas algunas columnas llegan a la falla total.

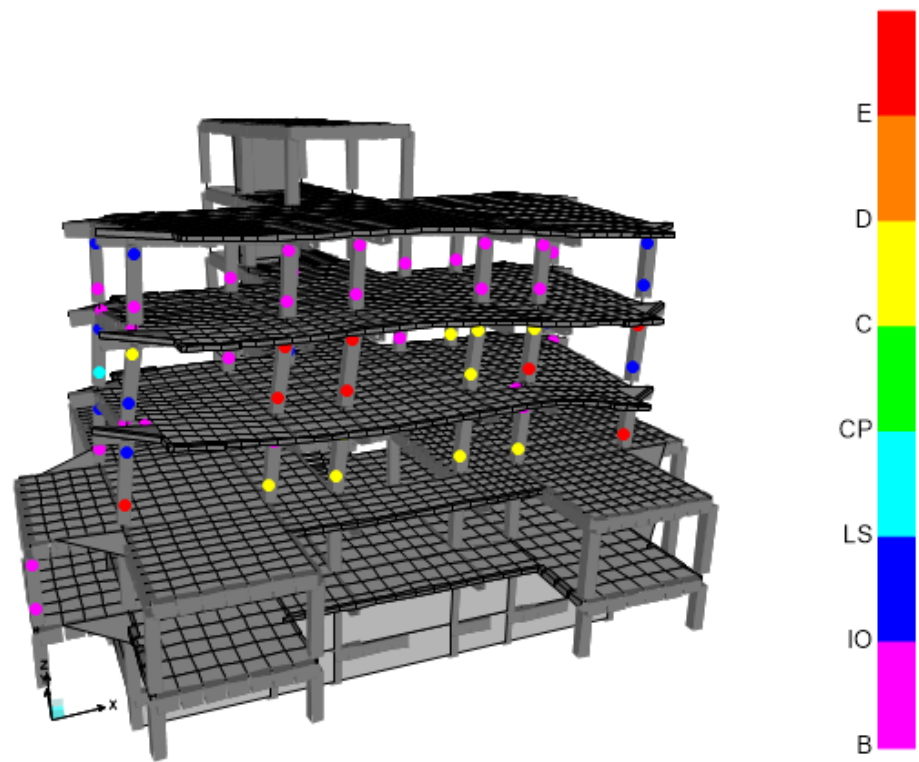


Figura 54, Resultado análisis SAP2000, articulaciones formadas en columnas y vigas.

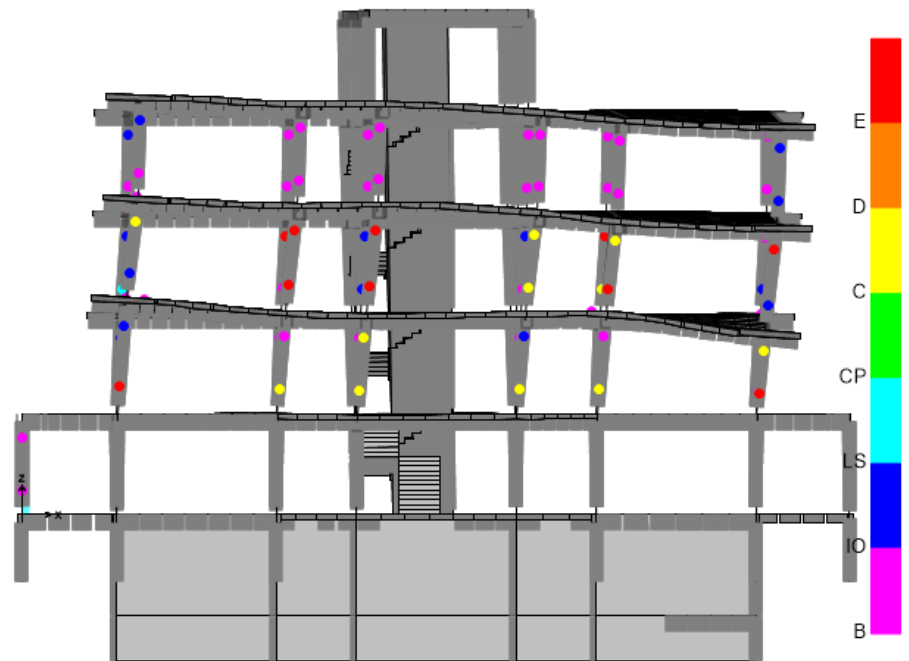


Figura 55, Resultado análisis SAP2000, articulaciones formadas en columnas y vigas.

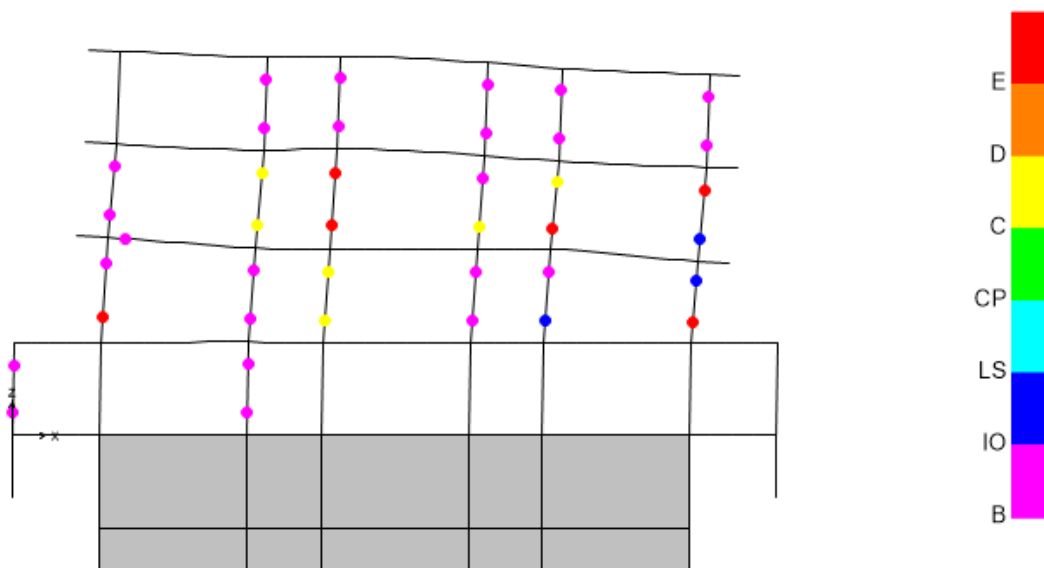


Figura 56, Resultado análisis SAP2000, articulaciones formadas en columnas y vigas.

- A continuación, en la tabla 3, se muestra el cálculo de las derivas de piso, obteniendo como resultado del programa las derivas elásticas las cuales se transforman en derivas inelásticas mediante la fórmula indicada a continuación.

$$\Delta_M = 0.75 \times R \times \Delta_E$$

Siendo R el factor de reducción de resistencia que se lo obtiene según la clasificación de la norma NEC-SD-DS. (CAMICON & MIDUVI, 2015b)

Habiendo obtenido la deriva elástica “ $\Delta_E$ ” de la siguiente manera,

$$\Delta_E = \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{h}$$

Siendo  $i$  el número de piso en consideración y  $h$  la altura de entrepiso.

Según la norma NEC-SE-DS, la deriva inelástica calculada no debe ser mayor a 0.02 (CAMICON & MIDUVI, 2015b), teniendo en los pisos 2, 3 y 4 derivas inelásticas mayores a las permitidas según norma.

Tabla 3, Derivas de piso, modelo sin disipadores, SAP2000.

PUNTO MEDIO - 10.98 s			DERIVAS EN X			
PISO	ELEVACIÓN N	ALTURA DE ENTREPISO	$\delta_{E\text{ máx}}$	$\Delta_E$	$\Delta_M$	COMENTARIO
	(m)	(cm)	(cm)			
0	0	0	0	0	0	
1	3.78	378	0.85	0.002	0.013	OK
2	7.56	378	3.55	0.007	0.043	REVISAR
3	11.34	378	6.08	0.007	0.040	REVISAR
4	15.12	378	7.4	0.003	0.021	REVISAR

- En las figuras 57 y 58 se muestran resultados gráficos, referentes a deriva existente por piso, así como su deformación elástica máxima respectivamente.

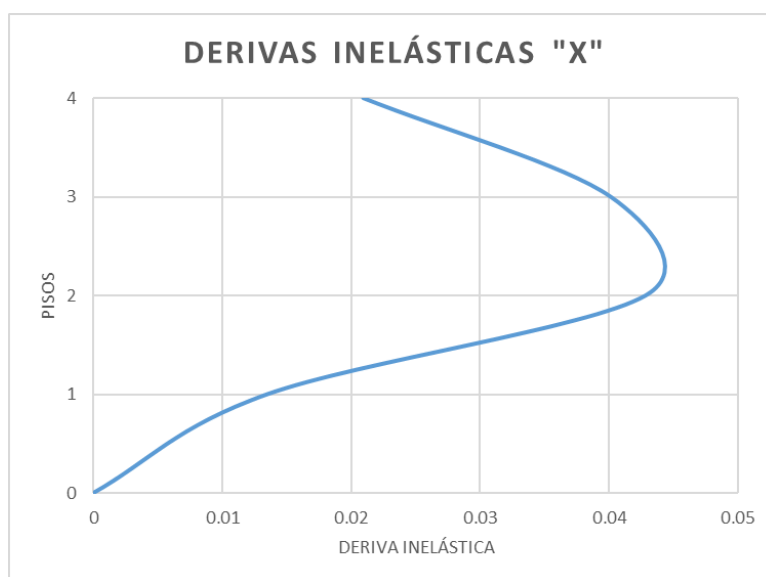


Figura 57, Derivas inelásticas modelo sin disipadores, SAP2000



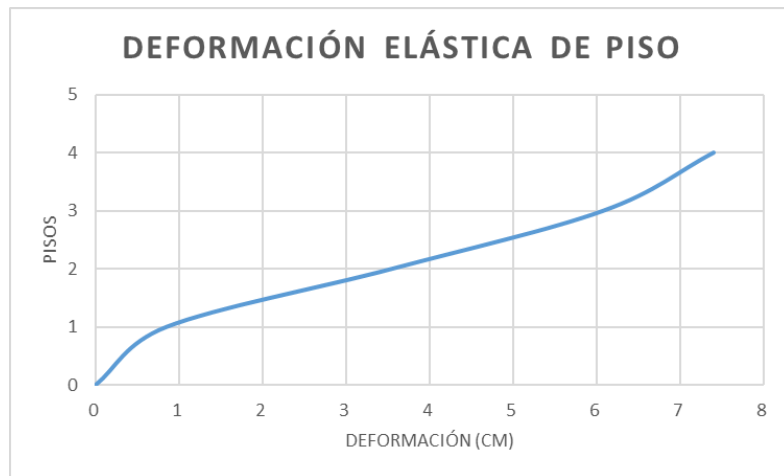


Figura 58, Deformación elástica por piso, modelo estructural sin disipadores

- En las figuras 59, 60, 61 y 62, se muestran los desplazamientos máximos obtenidos antes de que exista la primera rótula indicando falla total, mediante las cuales se calcularon las derivas, esto se da en el segundo 10.98.

Joint Displacements				
Joint Object	292	Joint Element	292	
	1	2	3	
Trans	7.40018	-1.32312	0.00000	
Rotn	0.00000	0.00000	0.00216	

Figura 59, Desplazamiento máximo en 4to piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm)

Joint Displacements				
Joint Object	293	Joint Element	293	
	1	2	3	
Trans	6.08006	-0.90647	0.00000	
Rotn	0.00000	0.00000	0.00217	

Figura 60, Desplazamiento máximo en 3er piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm)

Joint Displacements				
Joint Object	295	Joint Element	295	
	1	2	3	
Trans	3.55023	-0.50584	0.00000	
Rotn	0.00000	0.00000	0.00133	

Figura 61, Desplazamiento máximo en 2do piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm)

Joint Displacements				
Joint Object	2580	Joint Element	2580	
	1	2	3	
Trans	0.84188	-0.10688	0.05382	
Rotn	-1.945E-05	7.727E-04	2.651E-04	

Figura 62, Desplazamiento máximo en 1er piso, modelo sin disipadores, SAP2000, unidades (cm)

- Se obtendrá también el cortante basal, el cual se muestra en las figuras 63 y 64, teniendo el cortante basal obtenido en x e y respectivamente, dando como resultado un cortante basal máximo en x de 506.8 toneladas y en la dirección y con un valor de 145.6 toneladas.

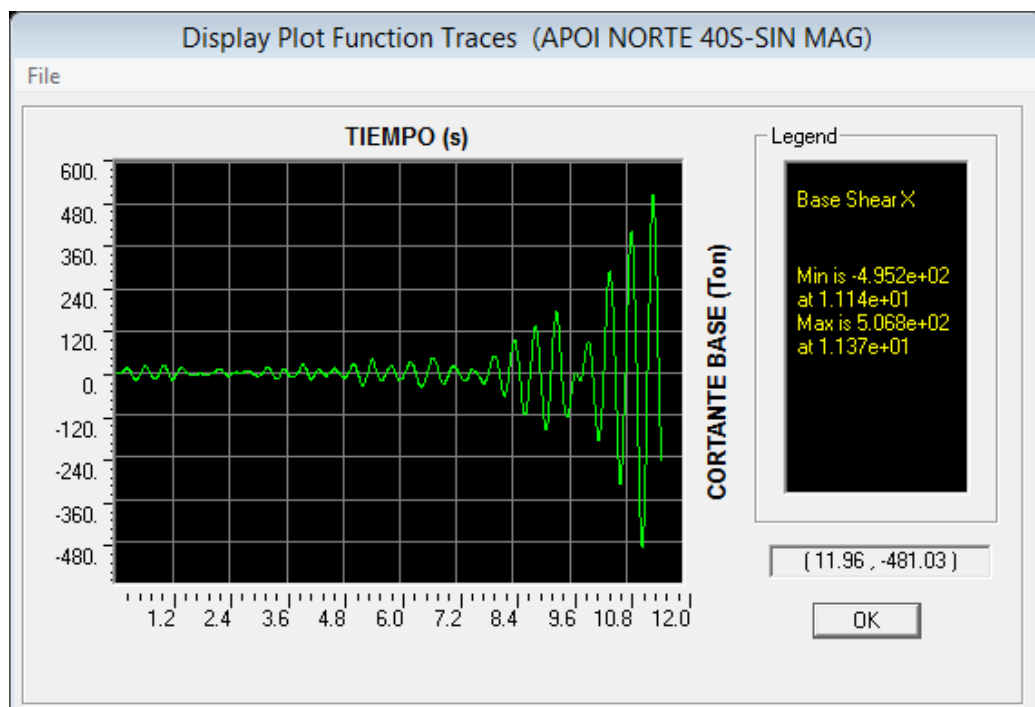


Figura 63, Cortante Basal en x, modelo estructural sin disipadores, SAP2000

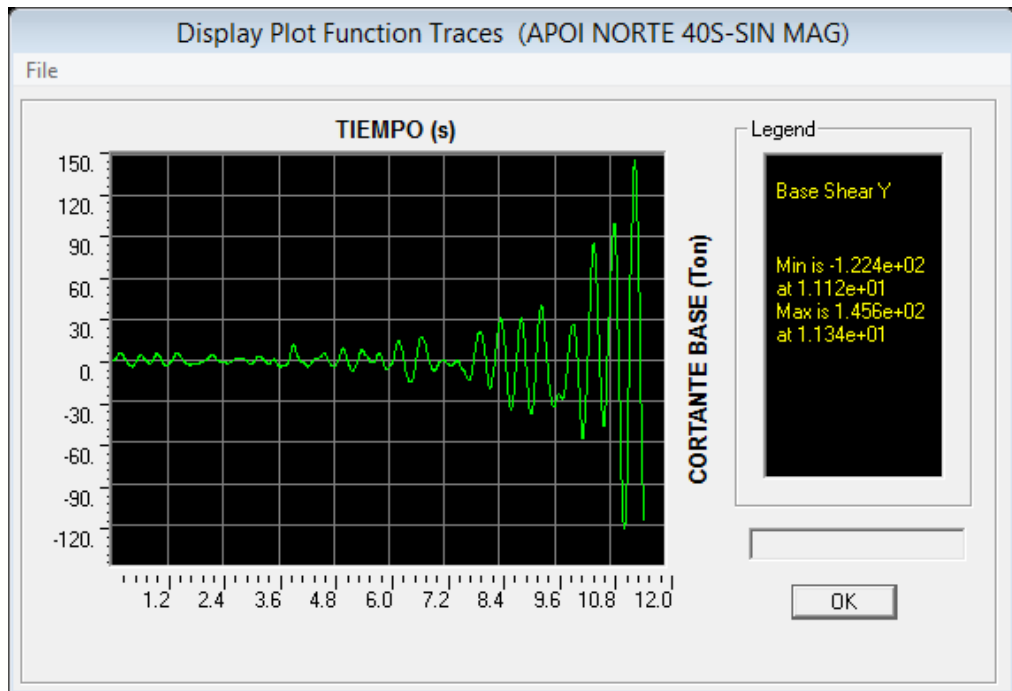


Figura 64, Cortante Basal en y, modelo estructural sin disipadores, SAP2000

- Para obtener una comparación entre las cargas que soporta un elemento estructural antes y después de la colocación de disipadores de energía se han obtenido los resultados de fuerza axial, cortante y momento, mostrados en las figuras 65, 66 y 67 respectivamente, para la columna 26 correspondiente al primer piso, teniendo como resultado una fuerza axial de 60.31 (ton), un cortante de 45.25 (ton) y un momento de 72.30 (ton.m).

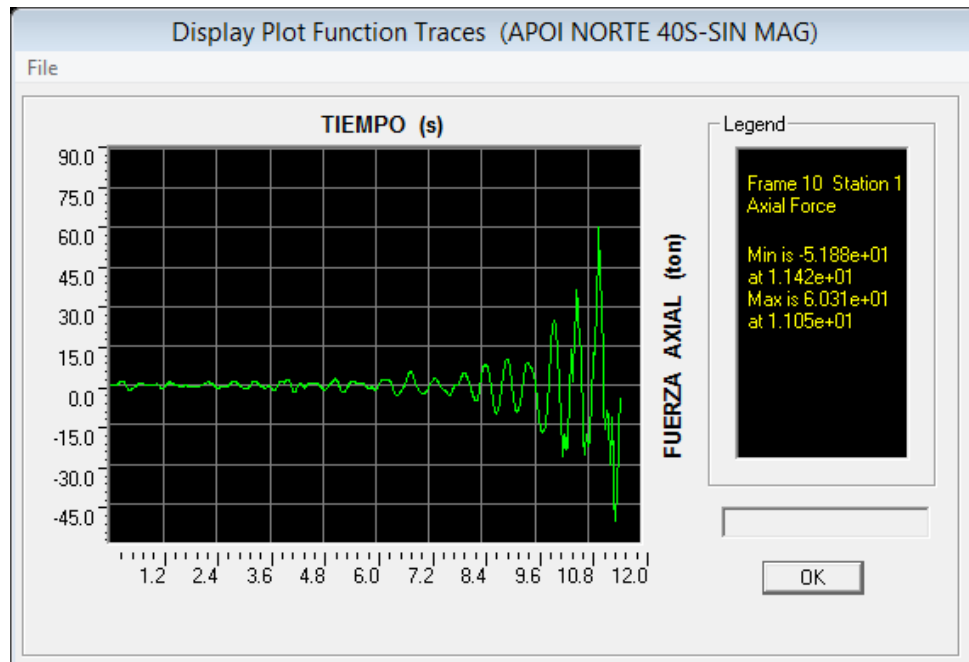


Figura 65, Fuerza axial de columna 26 primer piso, modelo estructural sin disipadores, SAP2000

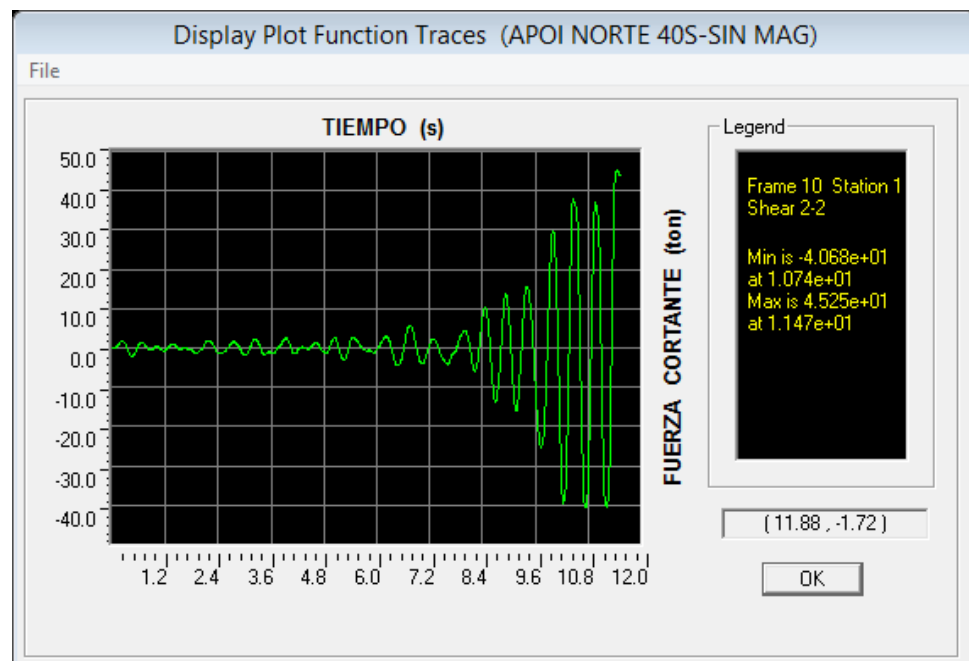


Figura 66, Fuerza cortante columna 26 primer piso, modelo estructural sin disipadores, SAP2000

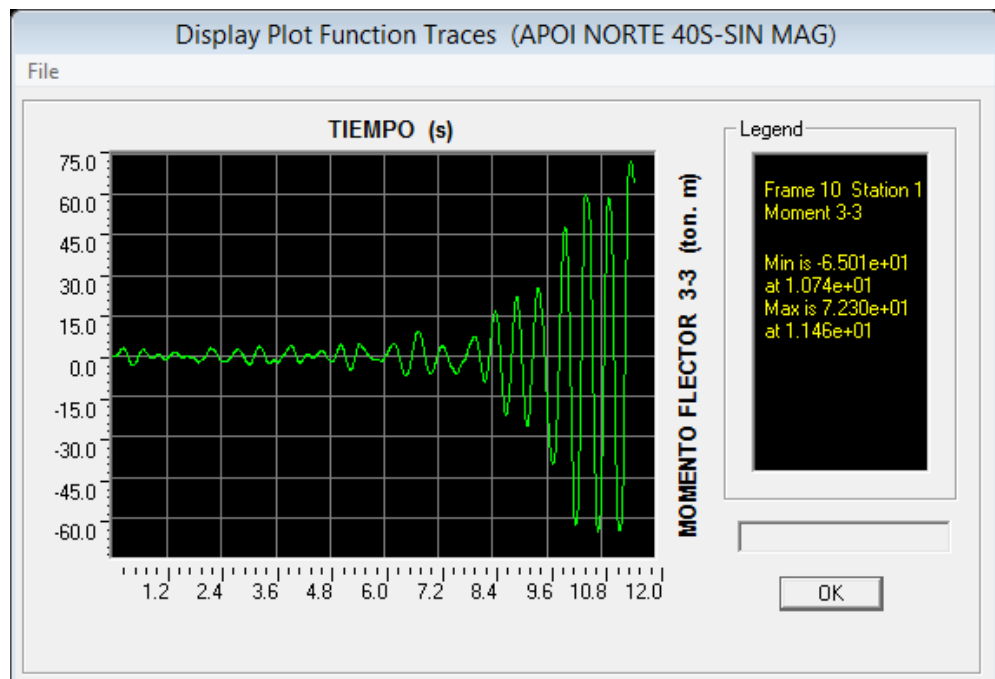


Figura 67, Momento de columna 26 primer piso, modelo estructural sin disipadores, SAP2000

### 5.1.2. Resultados de una estructura con disipadores de energía, acoplados de una manera convencional (diagonal), con condiciones ideales.

- En la figura 68, 69 y 70, se muestra el resultado post análisis de la estructura, pudiendo observar las rótulas plásticas formadas en columnas y vigas. Observamos que ahora ya no se forman la misma cantidad de rótulas plásticas en el modelo estructural con disipadores de energía colocados en forma diagonal, queriendo decir que la mayoría de los elementos estructurales se comportarán linealmente, solo dos columnas inferiores se encontrarán en el rango de ocupación inmediata.

Esto es una disminución apreciable de daño en los elementos estructurales con respecto a una estructura sin disipadores de energía.

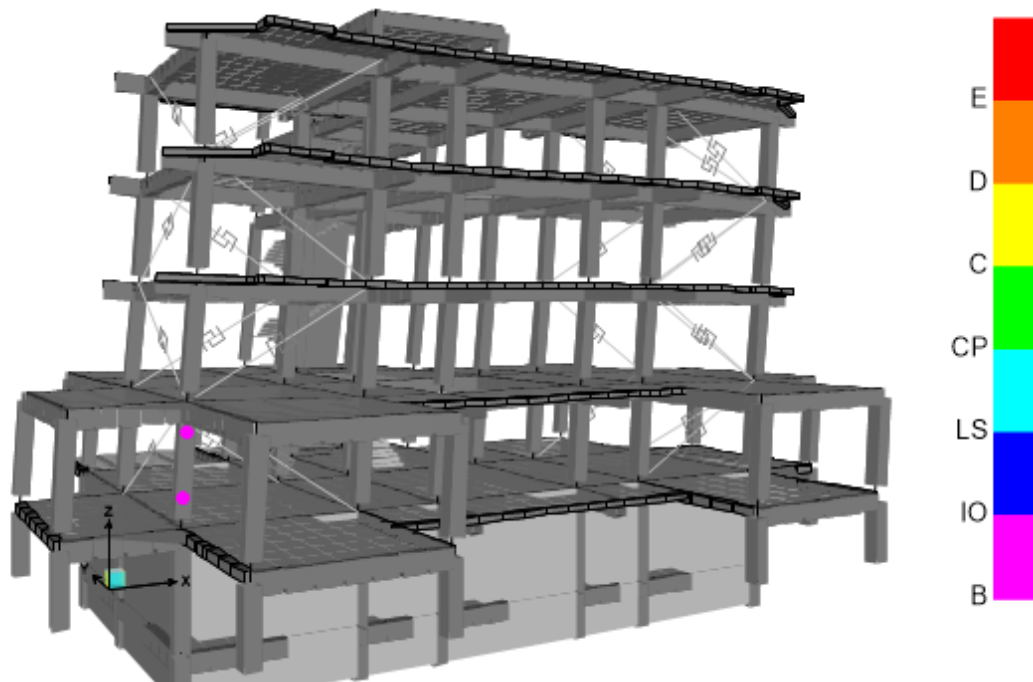


Figura 68, Rótulas plásticas post análisis, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

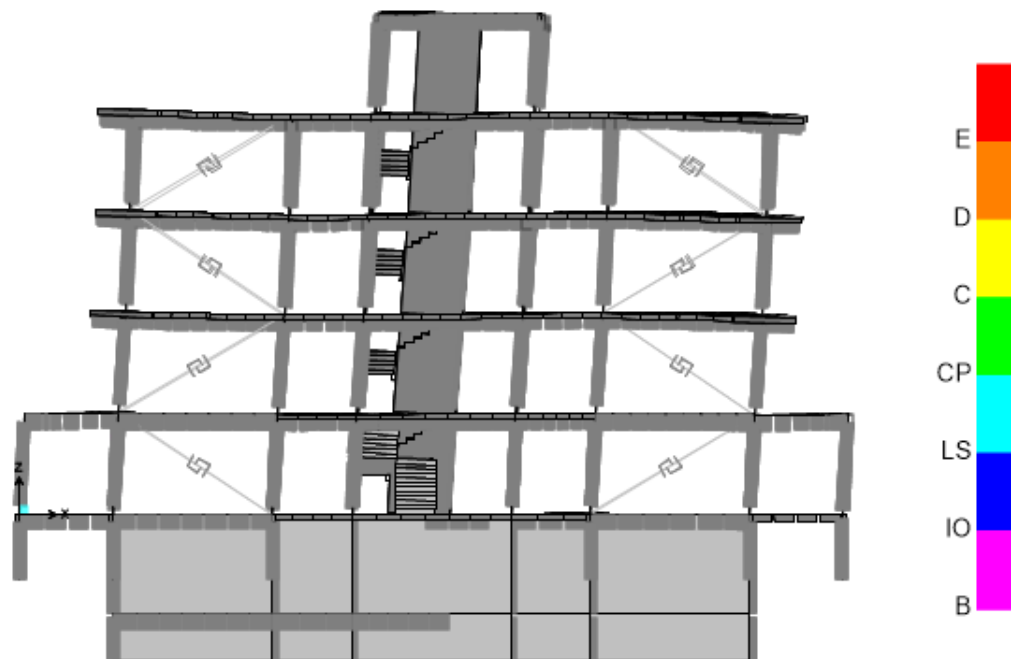


Figura 69, Rótulas plásticas post análisis, modelo estructural con dissipadores en diagonal, SAP2000

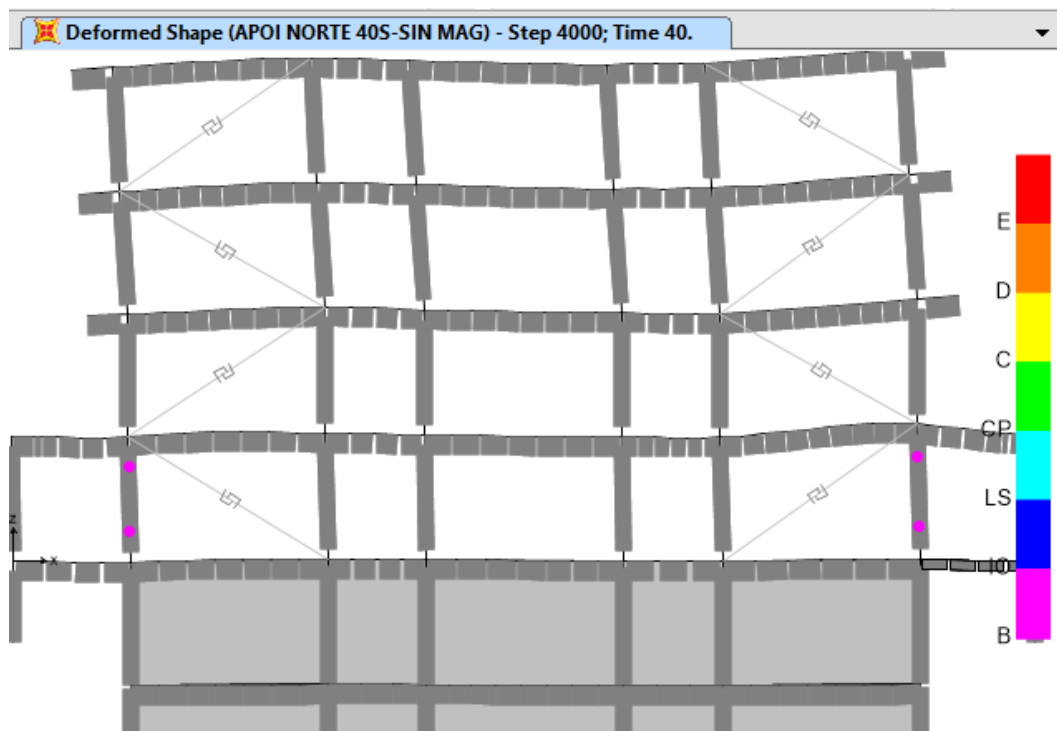


Figura 70, Rótulas plásticas post análisis, modelo estructural con dissipadores en diagonal, SAP2000

- A continuación, en la tabla 4, se muestra el cálculo de las derivas de piso, obteniendo como resultado del programa las derivas elásticas las cuales se transforman en derivas inelásticas mediante el procedimiento indicado anteriormente.

Ya con la aplicación de disipadores de energía en la estructura, las derivas inelásticas obtenidas cumplen con la norma, obteniendo una disminución apreciable en cuanto a derivas con respecto a una estructura sin disipadores.

*Tabla 4, Derivas de piso, modelo estructural con disipadores en diagonal.*

PUNTO MEDIO - 10.83 s			DERIVAS EN X			
PISO	ELEVACIÓN	ALTURA DE ENTREPISO	$\delta_E máx$	$\Delta_E$	$\Delta_M$	COMENTARIO
	(m)	(cm)	(cm)			
0	0	0	0	0	0	
1	3.78	378	0.48	0.001	0.008	OK
2	7.56	378	1.14	0.002	0.010	OK
3	11.34	378	1.62	0.001	0.008	OK
4	15.12	378	1.96	0.001	0.005	OK

- En las figuras 71 y 72 se muestran resultados gráficos, referentes a la deriva existente por piso, así como su deformación elástica máxima respectivamente.



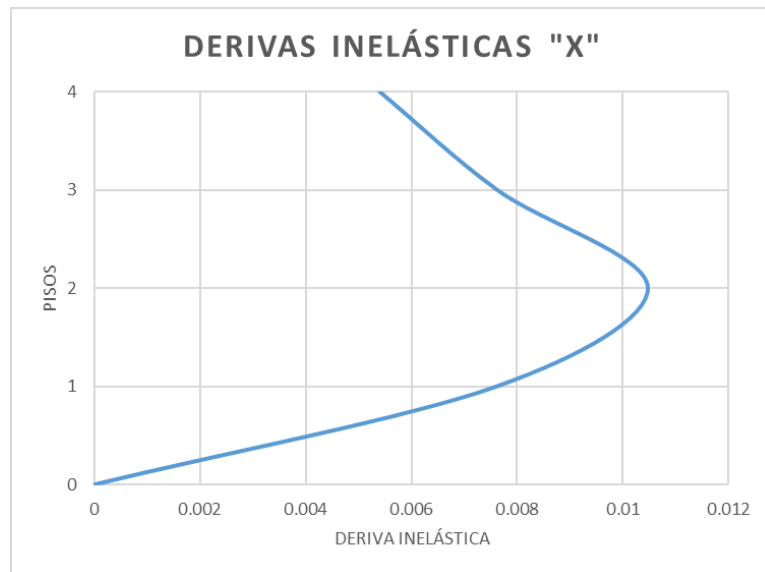


Figura 71, Derivas inelásticas modelo con disipadores en diagonal, SAP2000

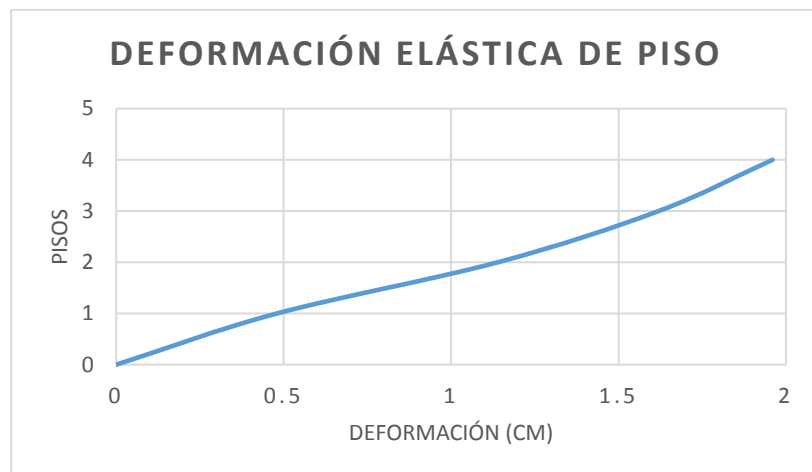


Figura 72, Deformación elástica por piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000

- En las figuras 73, 74, 75 y 76, se muestran los desplazamientos máximos de cada piso en sentido descendente respectivamente, obtenidos en el análisis tiempo historia del modelo estructural, mediante las cuales se calcularon las derivas, esto se da en el segundo 10.83.

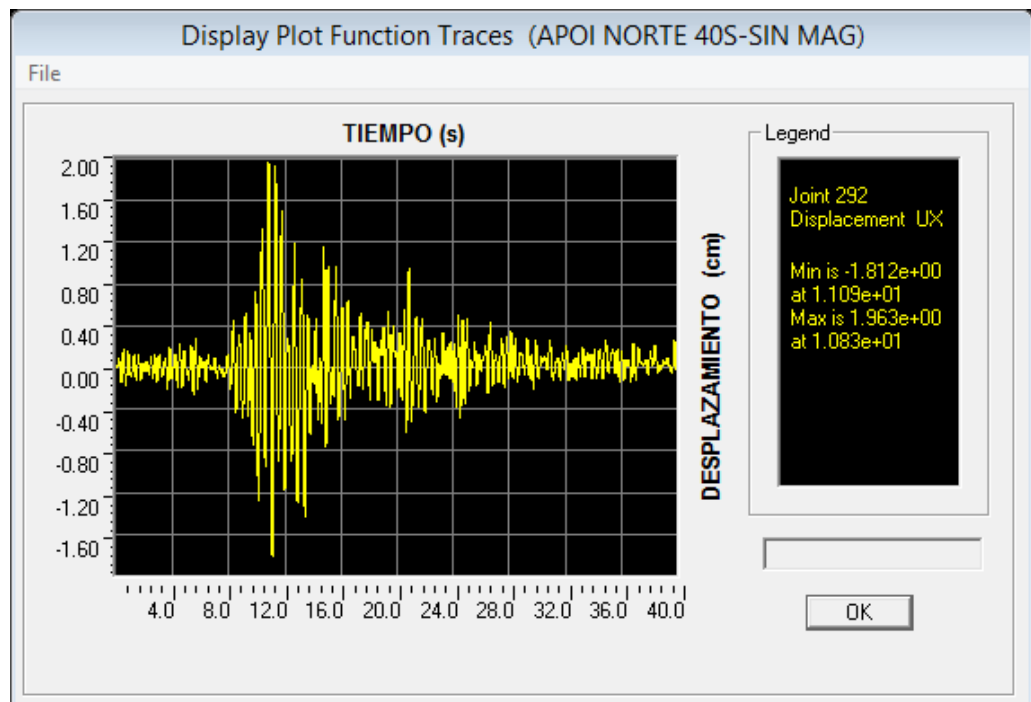


Figura 73, Desplazamiento máximo en 4to piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000

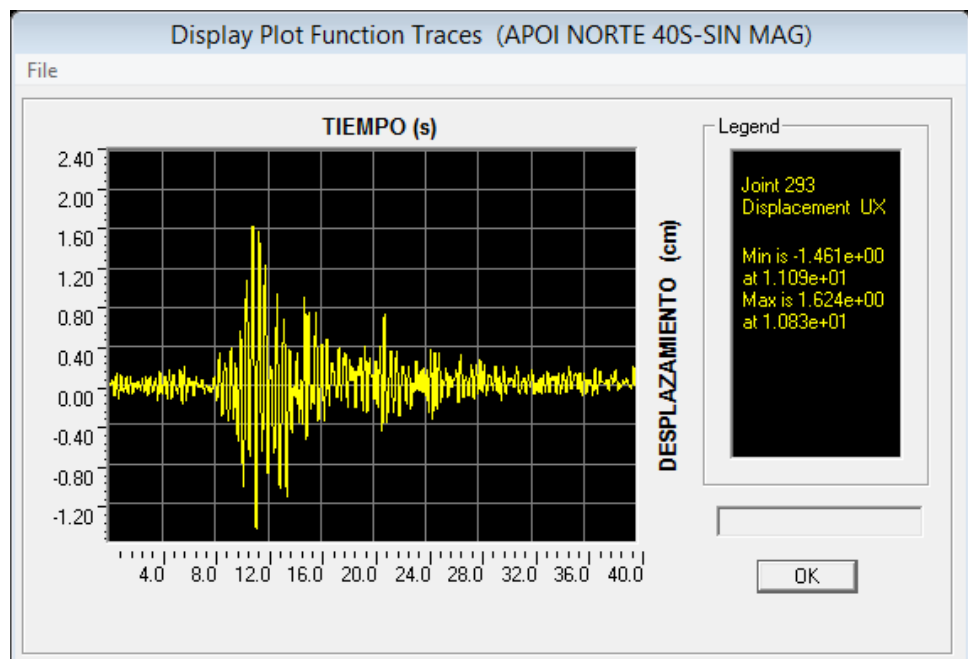


Figura 74, Desplazamiento máximo en 3er piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000

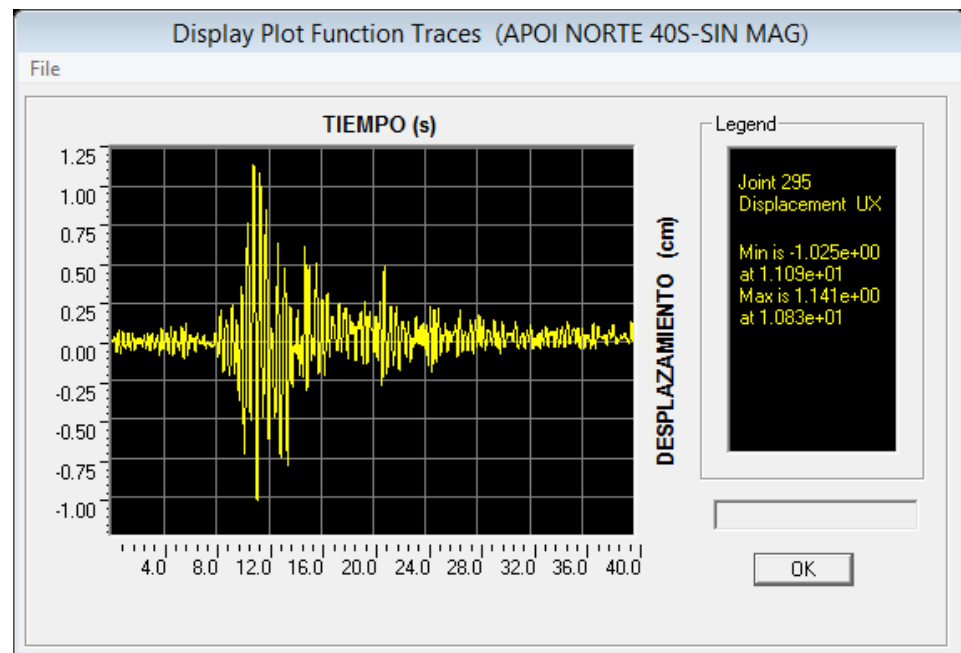


Figura 75, Desplazamiento máximo en 2do piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000

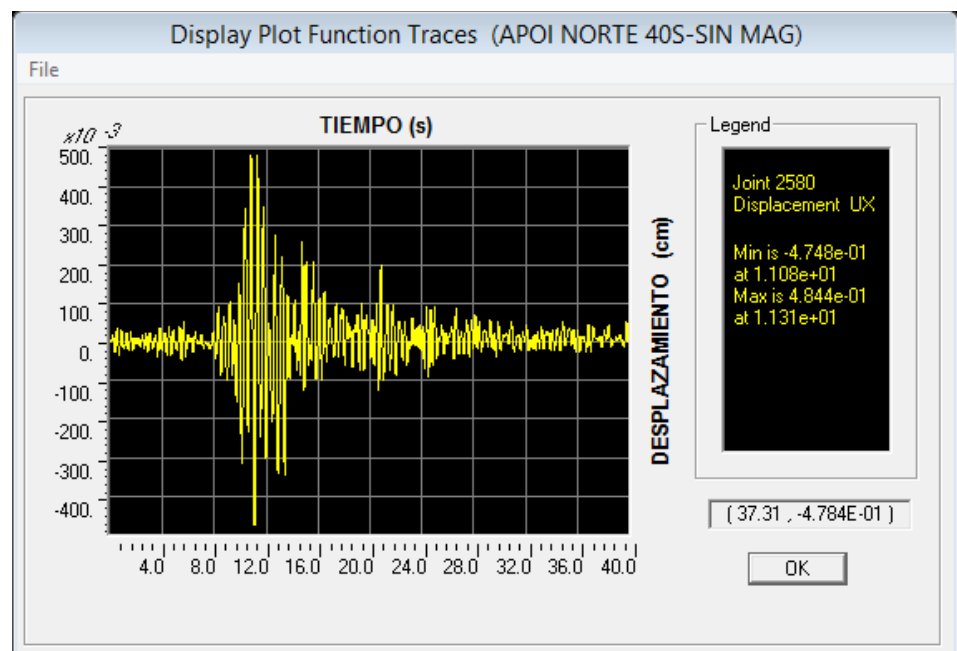


Figura 76, Desplazamiento máximo en 1er piso, modelo con disipadores en diagonal, SAP2000

- Se obtiene también el cortante basal, el cual se muestra en las figuras 77 y 78, teniendo el cortante basal obtenido en x e y respectivamente, dando como resultado un cortante basal máximo en x de 213.9 toneladas y en la dirección y con un valor de 71.39 toneladas, podemos observar que ha disminuido el valor del cortante basal en ambos sentidos con respecto al modelo anterior sin disipadores.

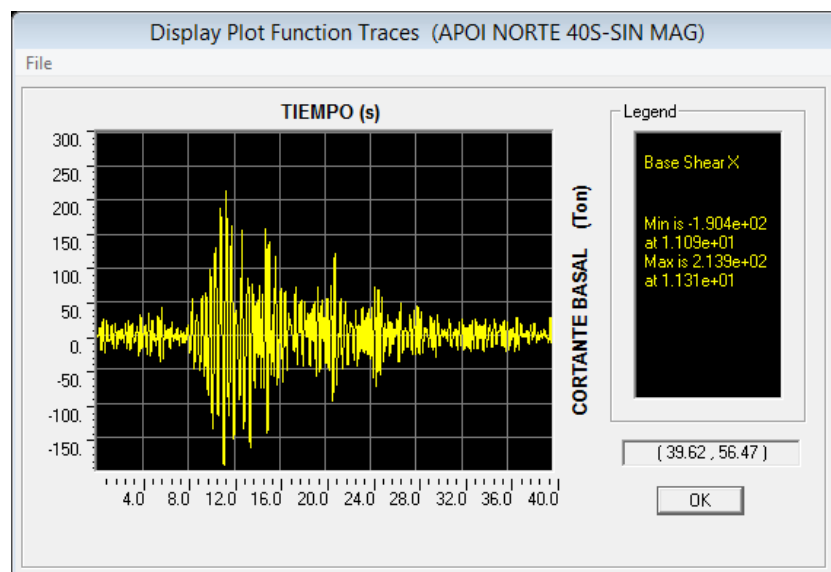


Figura 77, Cortante Basal en x, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

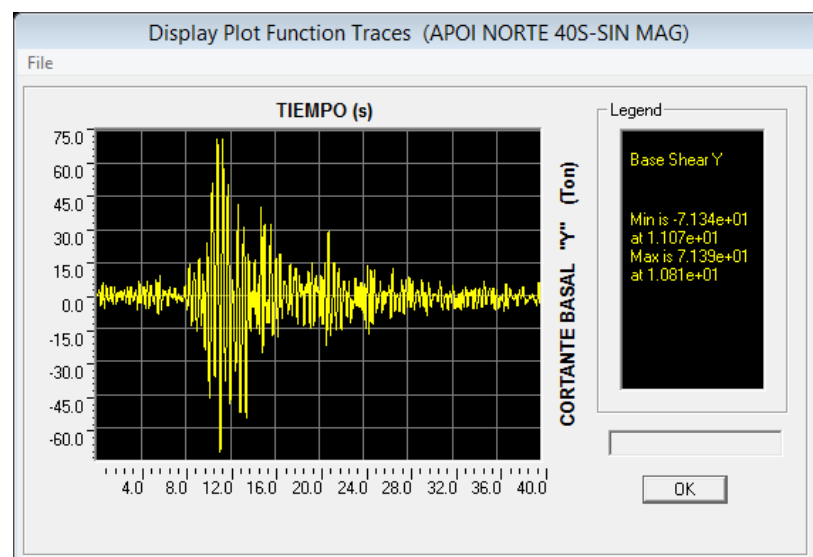


Figura 78, Cortante Basal en y, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

- Continuando con la comparación mencionada anteriormente con respecto a las fuerzas actuantes sobre la columna 26 sean estas fuerza axial, cortante y momento como se indica en las figuras 79, 80 y 81 respectivamente, se observa una disminución en cuanto a magnitud de fuerzas con respecto al modelo sin disipadores, teniendo como resultado una fuerza axial de 30.83 (ton), un cortante de 12.71 (ton) y un momento de 19.81 (ton.m).

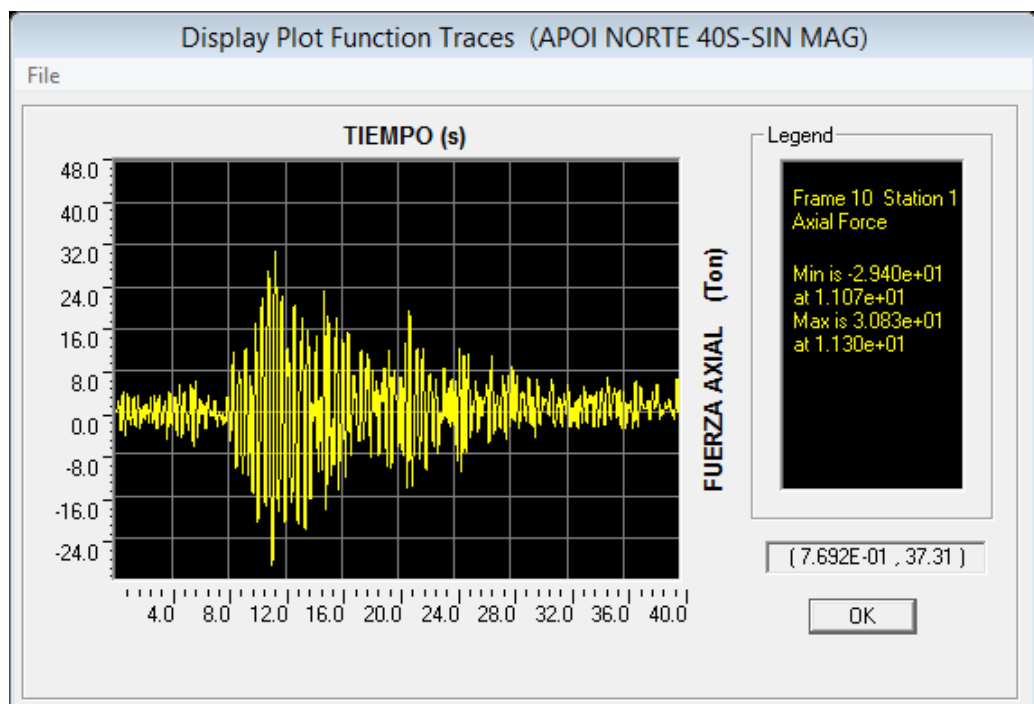


Figura 79, Fuerza axial actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

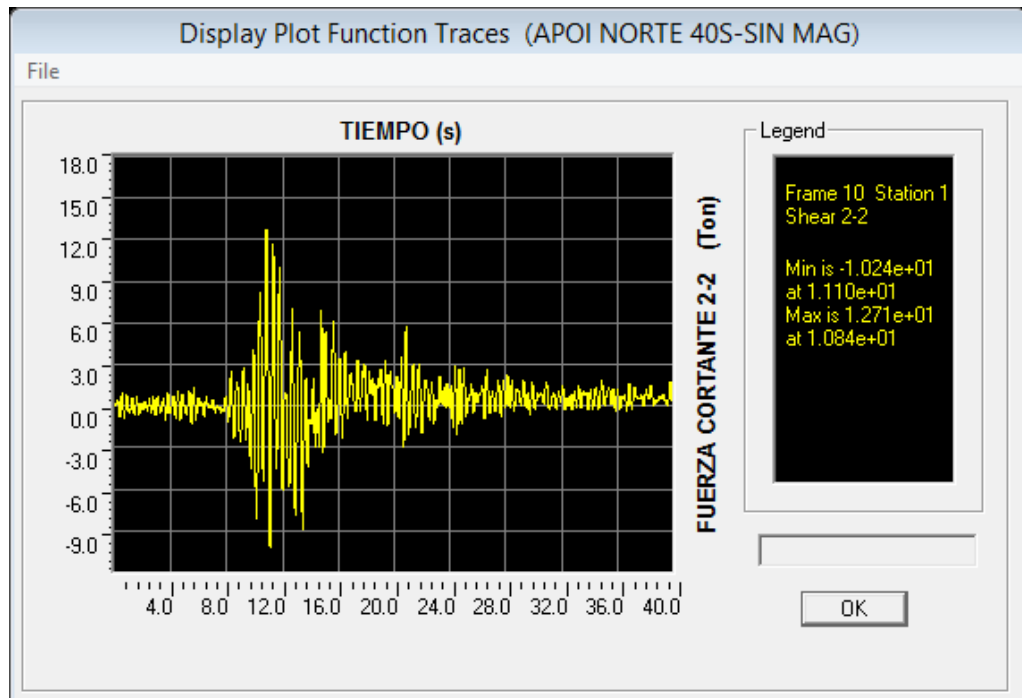


Figura 80, Cortante actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

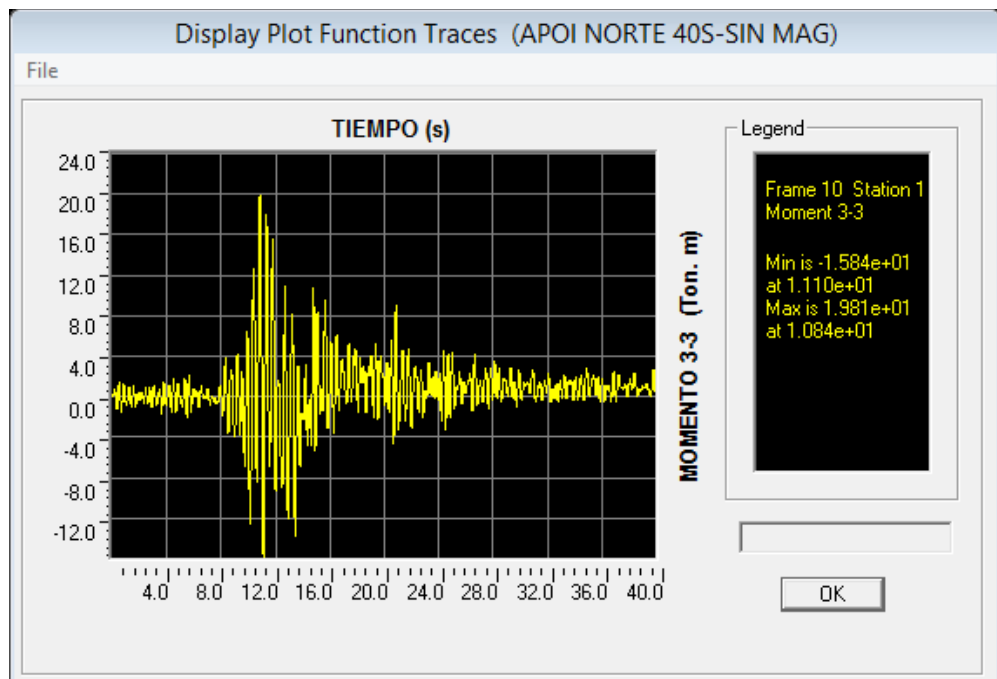


Figura 81, Momento actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

- Se puede observar el comportamiento de los disipadores de energía friccionales aplicados en este modelo en la figura 82, con una fuerza de 60 toneladas, para este tipo de acople diagonal la fuerza requerida en el disipador será la mencionada para obtener los desplazamientos indicados anteriormente.

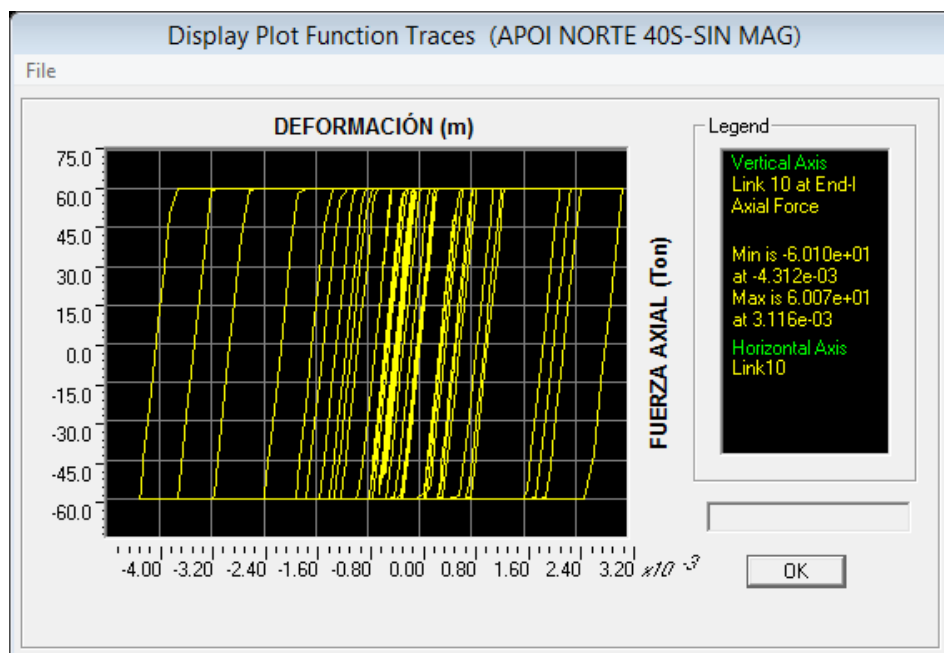


Figura 82, Ciclo de histéresis de disipador, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

- Según el programa SAP2000 la energía ingresada es de 464300 joules como se muestra en la figura 83 y la energía absorbida por los disipadores es igual a 96200 joules mostrada en la figura 84, en la figura 85 se presenta una comparación de la afectación que tienen los disipadores en cuanto a la magnitud de energía.

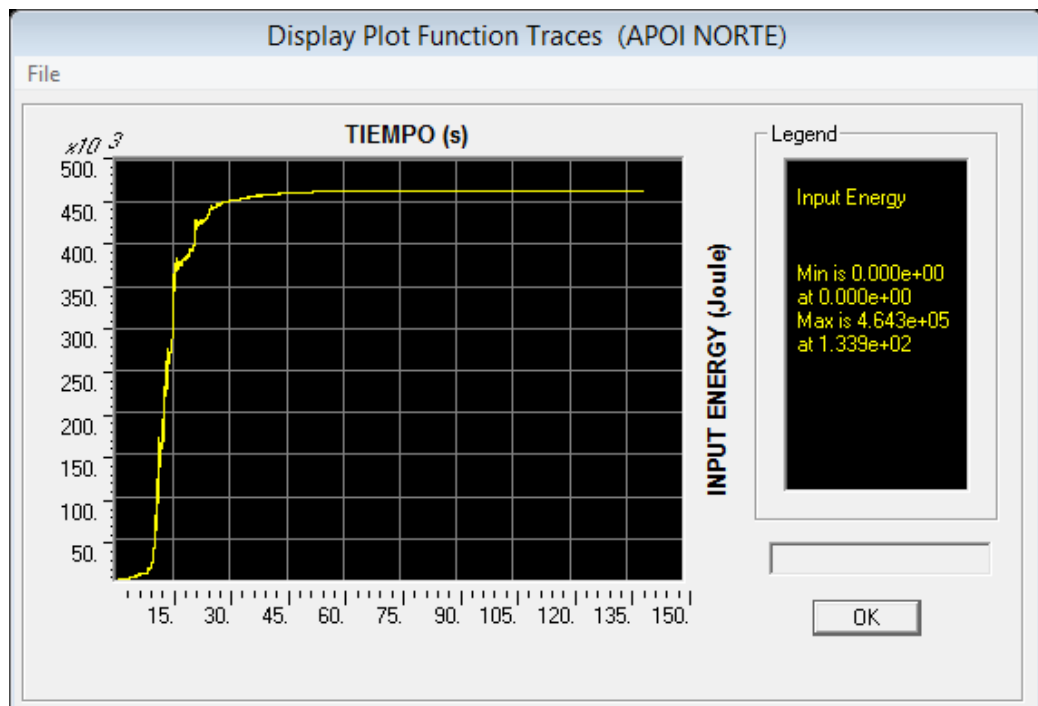


Figura 83, Input de energía, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

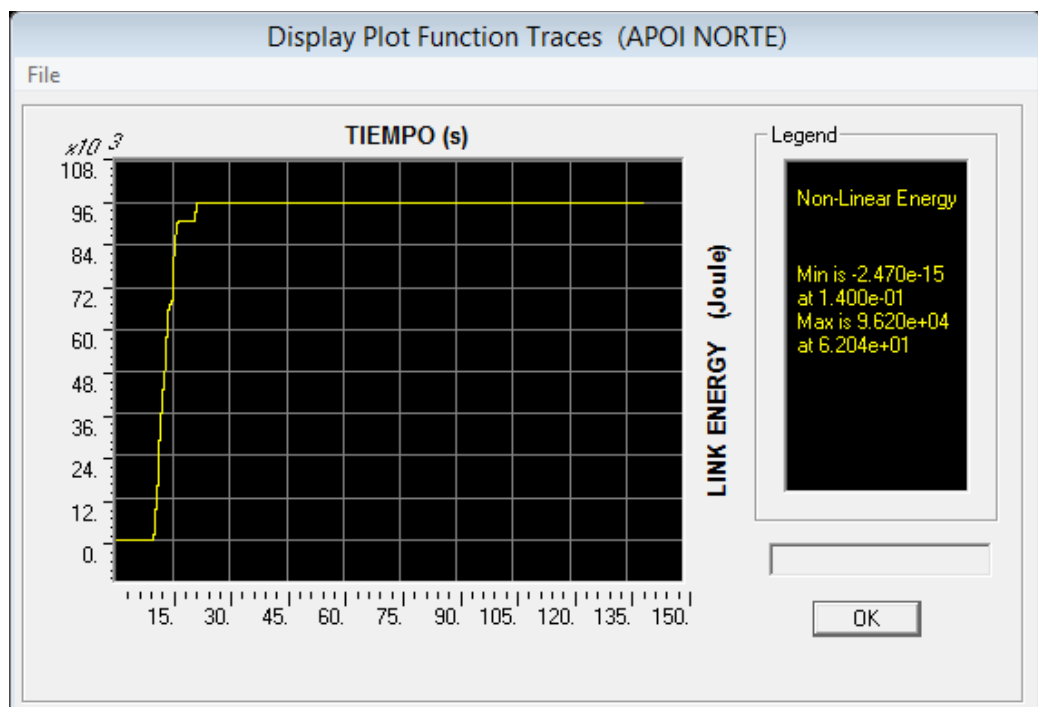


Figura 84, Energía absorbida por disipadores, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000



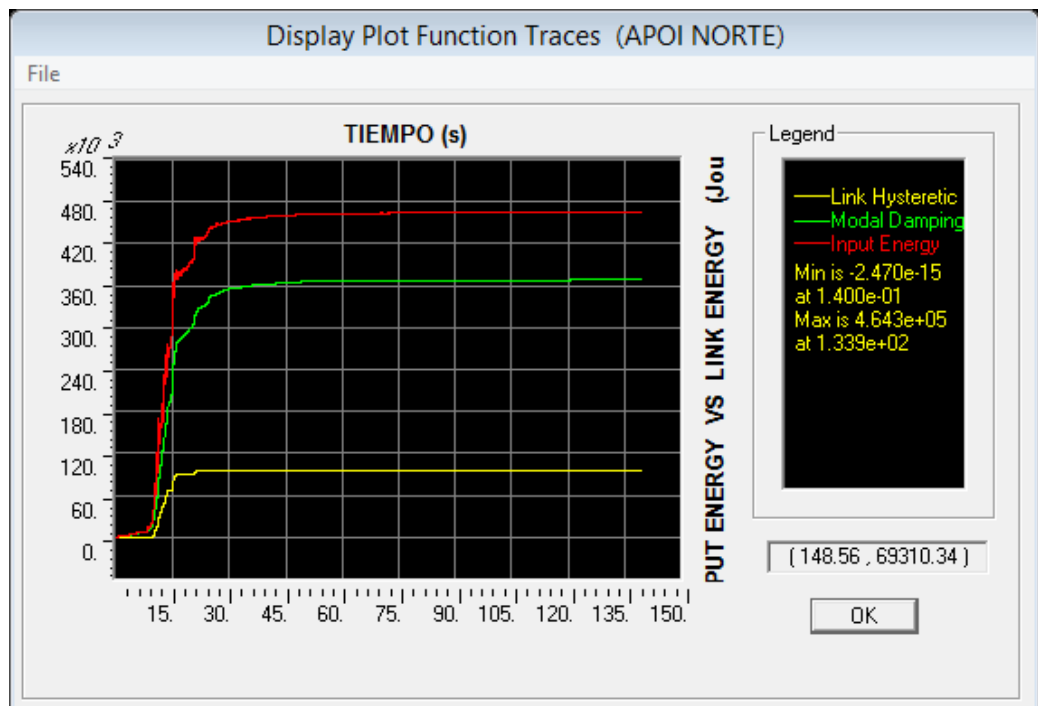


Figura 85, Comparación de energía ingresada vs energía disipadores, modelo estructural con disipadores en diagonal, SAP2000

**5.1.3. Resultados de una estructura con disipadores de energía, acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos (TOGGLE – BRACE y “ELAS”) en condiciones ideales.**

- En la figura 86, 87 y 88, se observa el resultado post análisis del modelo estructural acoplado a un mecanismo de amplificación de desplazamientos, se ha desarrollado una sola configuración para estos dos mecanismos de amplificación (TOGGLE y ELAS), los cuales se diferencian en cuanto a su factor de amplificación, es decir la fuerza requerida será afectada por dicho factor.

Se muestra entonces en las figuras mencionadas anteriormente el resultado de la estructura en cuanto a rótulas plásticas formadas en columnas y vigas. Teniendo como resultado la disminución en cantidad de rótulas plásticas en el modelo estructural con disipadores de energía acoplados a un mecanismo de amplificación de desplazamientos, es decir que la mayoría de los elementos estructurales se comportarán linealmente, solo dos columnas inferiores se encontrarán en el rango de ocupación inmediata.

Se ha obtenido una disminución apreciable de daño en los elementos estructurales con respecto a una estructura sin disipadores de energía, de la misma manera que con una configuración diagonal; la diferencia se encuentra en la fuerza requerida del disipador, ya que al tener un mecanismo de amplificación ésta será afectada por el factor de amplificación reduciendo en la misma magnitud la fuerza requerida que

con una configuración diagonal sin amplificación, esto con lleva a un ahorro económico significativo al requerir un disipador de menor fuerza.

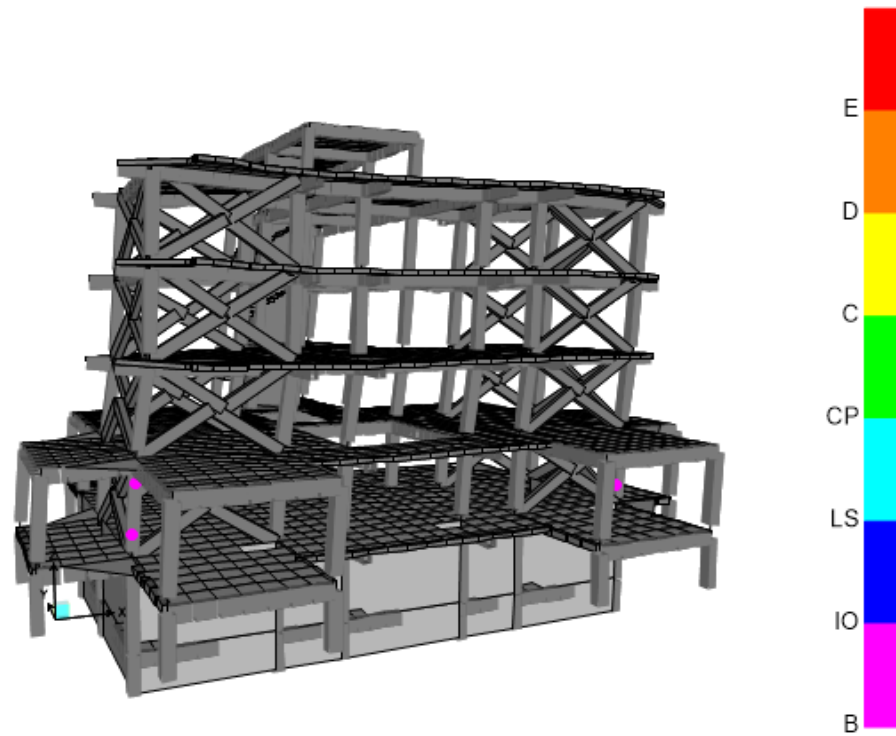


Figura 86, Rótulas plásticas formadas, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

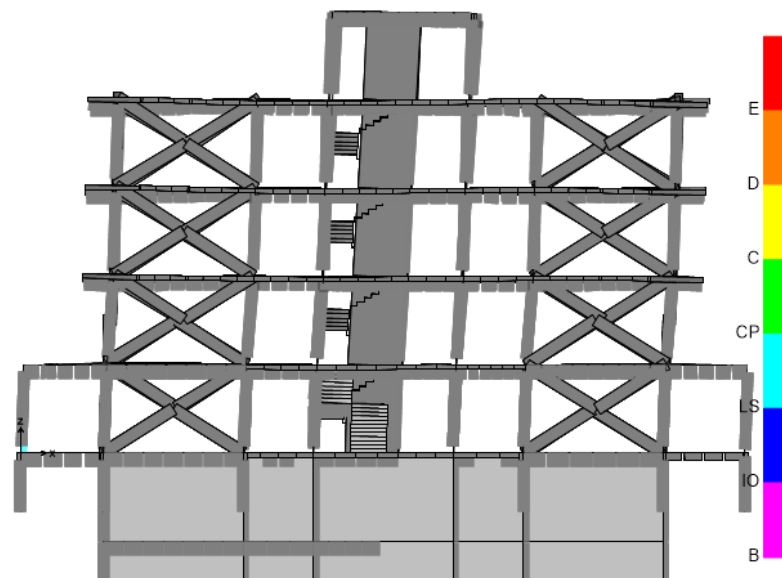


Figura 87, Rótulas plásticas formadas, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

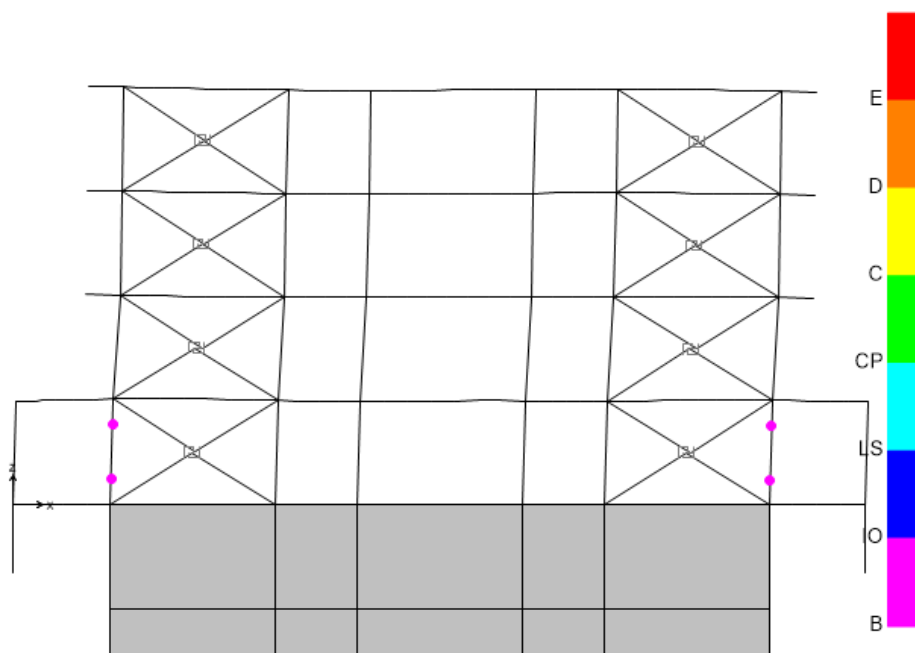


Figura 88, Rótulas plásticas formadas, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

- Se presenta a continuación, en la tabla 5, el cálculo de las derivas de piso, obteniendo como resultado del programa las derivas elásticas las cuales se transforman en derivas inelásticas mediante el procedimiento indicado anteriormente.

Con la aplicación de disipadores de energía se tuvo un decremento importante en cuanto a derivas, así como también se redujo las derivas en comparación con un acople diagonal.

Así un acople con mecanismos de amplificación de desplazamientos cumple con los requerimientos de norma en cuanto a derivas y resultaría más eficiente que un acople en diagonal, ya que a más de disminuir las derivas se requerirá una menor fuerza en el disipador.

Tabla 5, Derivas de piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

PUNTO MEDIO - 10.82 s			DERIVAS EN X			
PISO	ELEVACIÓN	ALTURA DE ENTREPISO	$\delta_{E\text{ máx}}$	$\Delta_E$	$\Delta_M$	COMENTARIO
	(m)	(cm)	(cm)			
0	0	0	0	0	0	
1	3.78	378	0.44	0.001	0.007	OK
2	7.56	378	0.98	0.001	0.009	OK
3	11.34	378	1.38	0.001	0.006	OK
4	15.12	378	1.69	0.001	0.005	OK

- En las figuras 89 y 90 se muestran resultados gráficos, referentes a la deriva existente por piso, así como su deformación elástica máxima respectivamente.

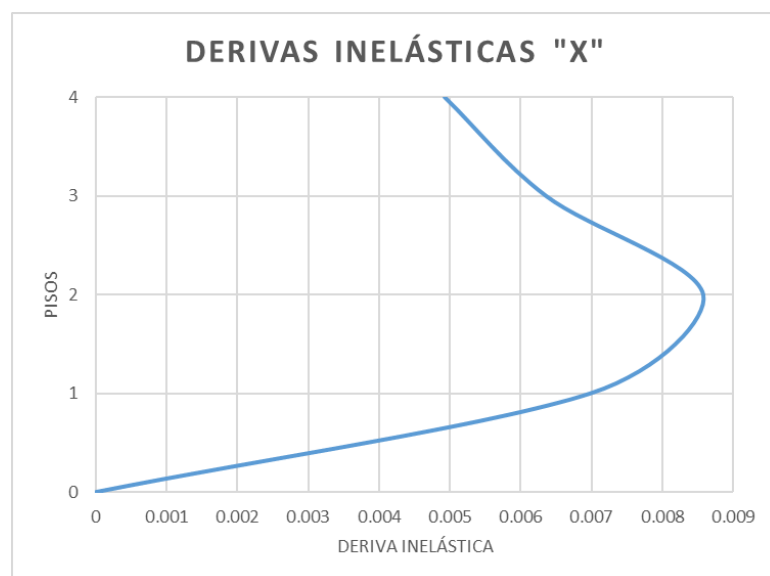


Figura 89, Deriva inelástica de piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

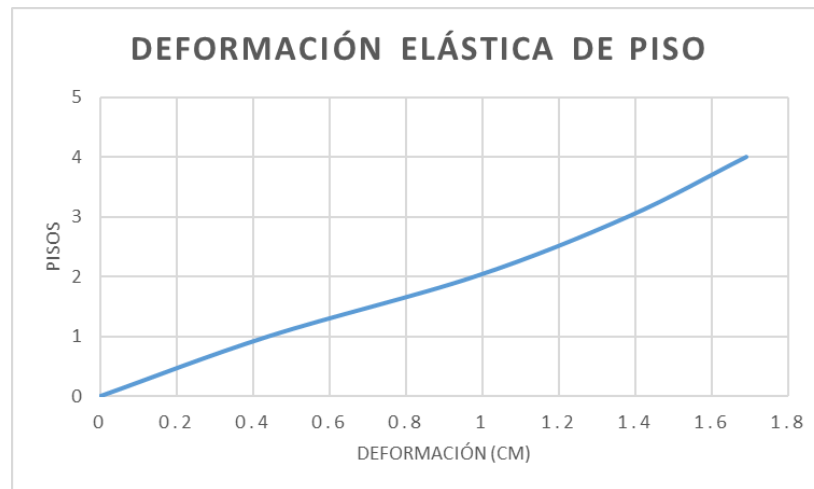


Figura 90, Deformación elástica por piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

- En las figuras 91, 92, 93 y 94, se muestran los desplazamientos máximos de cada piso en sentido descendente respectivamente, obtenidos en el análisis tiempo historia del modelo estructural, mediante los cuales se calcularon las derivas.

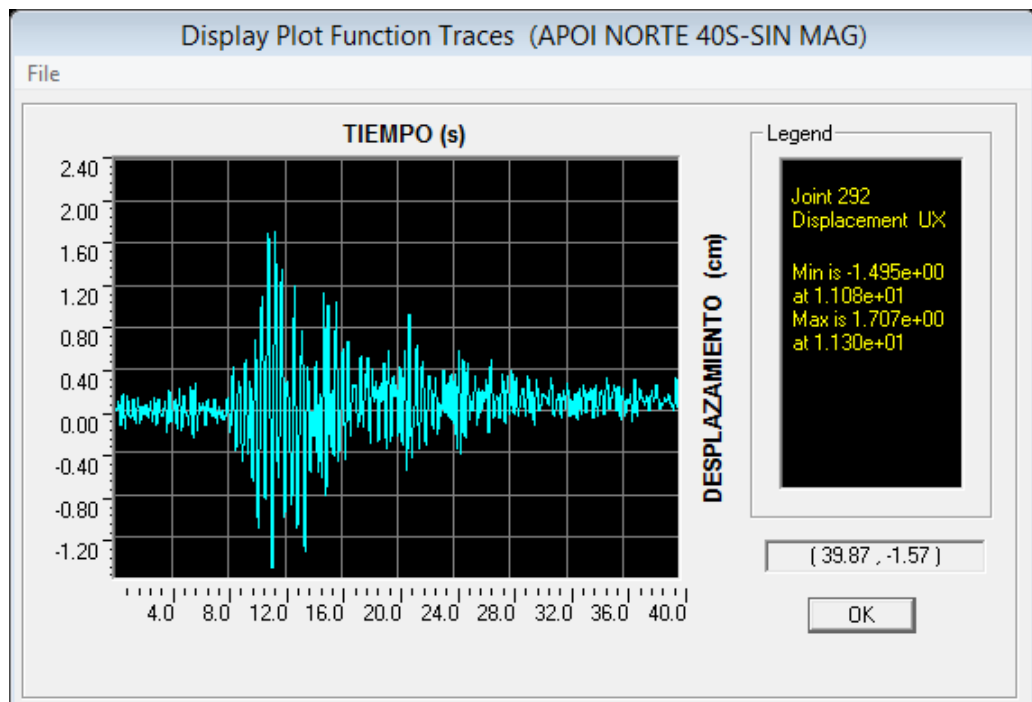


Figura 91, Desplazamiento 4to piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

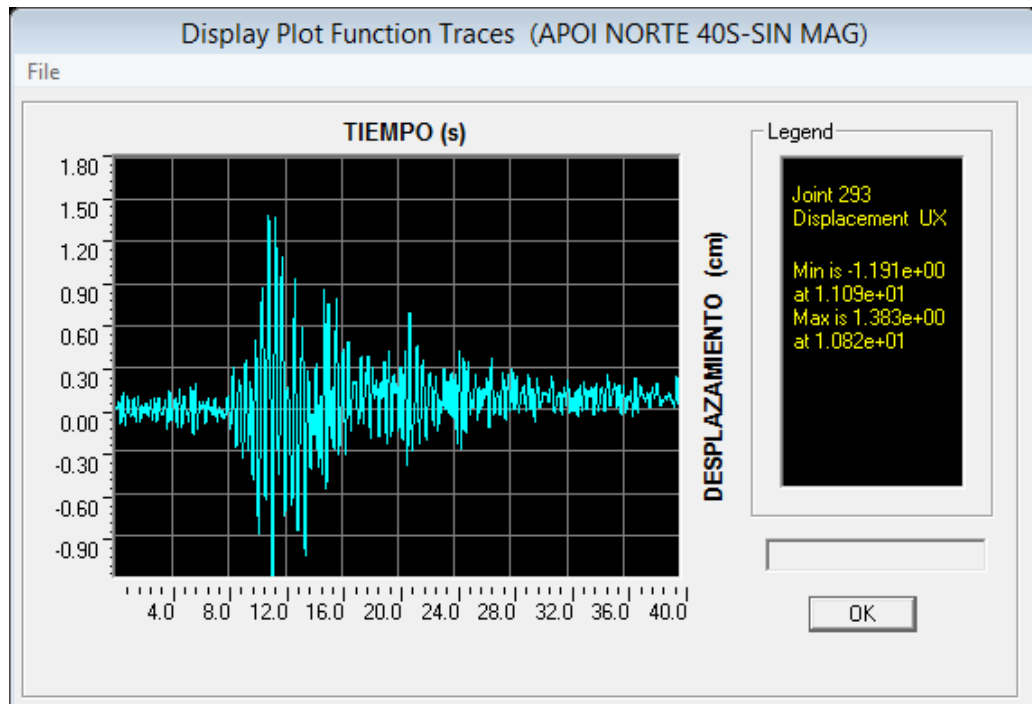


Figura 92, Desplazamiento 3er piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

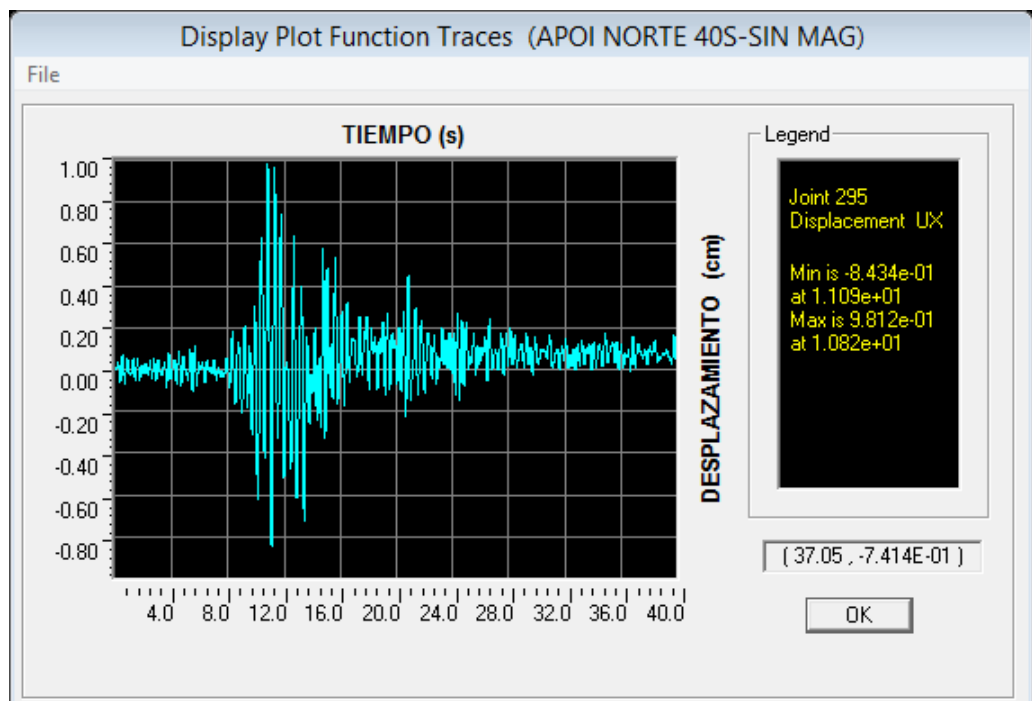


Figura 93, Desplazamiento 2do piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

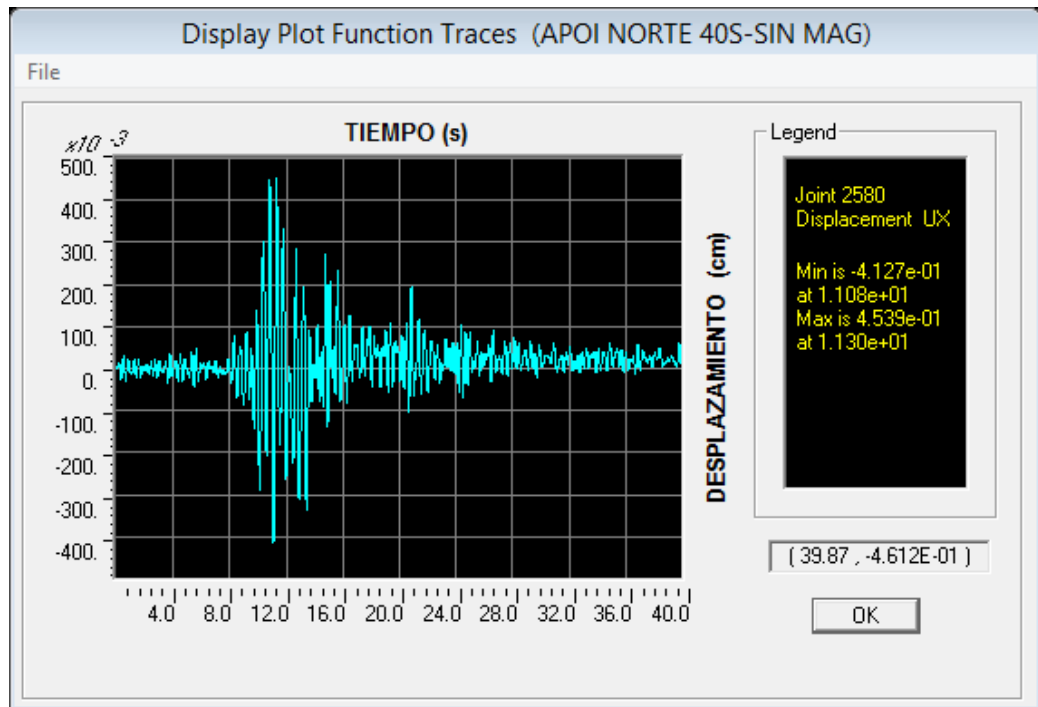


Figura 94, Desplazamiento 1er piso, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

- Se obtiene también el cortante basal, el cual se muestra en las figuras 95 y 96, teniendo el cortante basal obtenido en x e y respectivamente, dando como resultado un cortante basal máximo en x de 180.6 toneladas y en la dirección y con un valor de 63.67 toneladas, podemos observar que ha disminuido el valor del cortante basal en ambos sentidos con respecto al modelo sin disipadores y al modelo con acople diagonal.



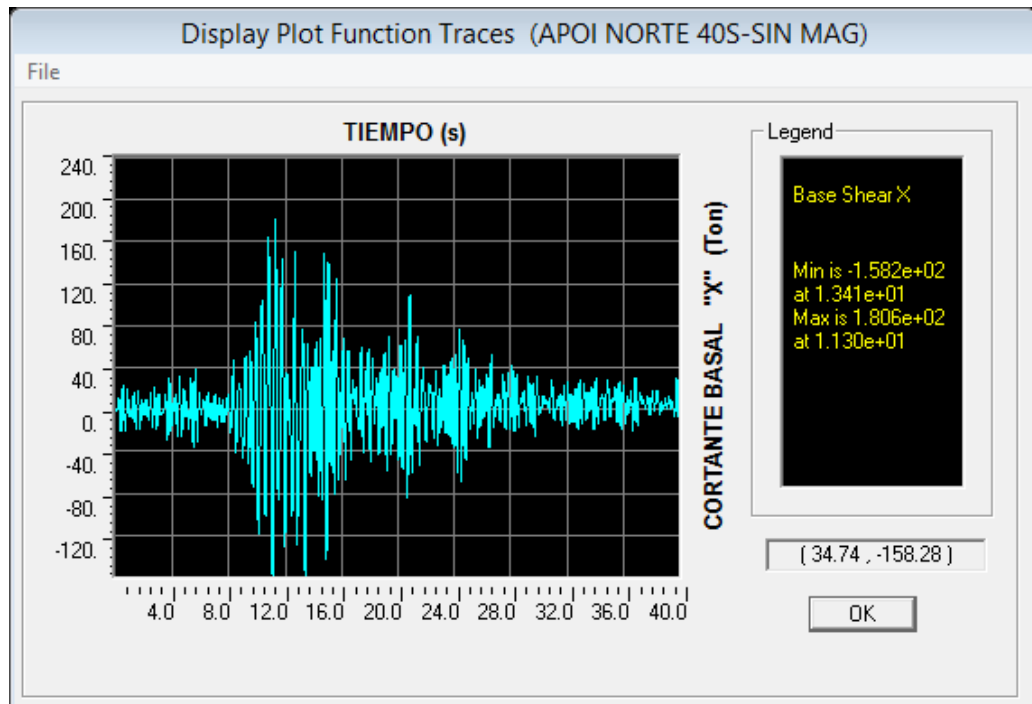


Figura 95, Cortante Basal en x, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

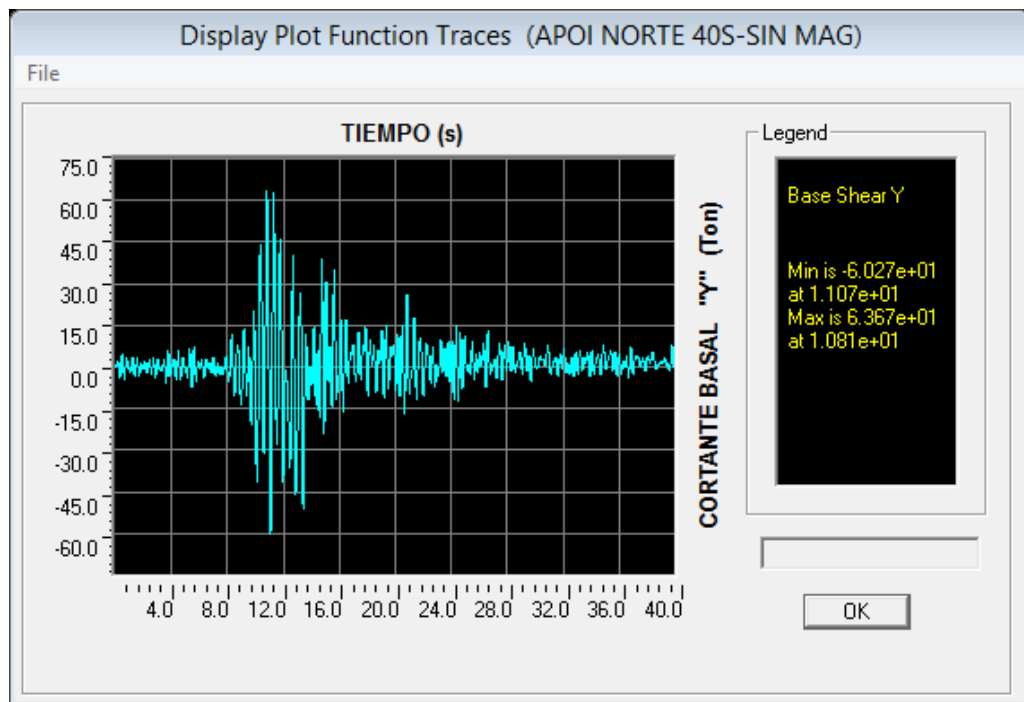


Figura 96, Cortante Basal en y, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

- En comparación respecto a las fuerzas actuantes sobre la columna 26 sean estas fuerza axial, cortante y momento como se indica en las figuras 97, 98 y 99 respectivamente, se observa una disminución en cuanto a magnitud de fuerzas con respecto al modelo sin disipadores, teniendo como resultado una fuerza axial de 31.04 (ton), un cortante de 10.40 (ton) y un momento de 16.17 (ton.m).

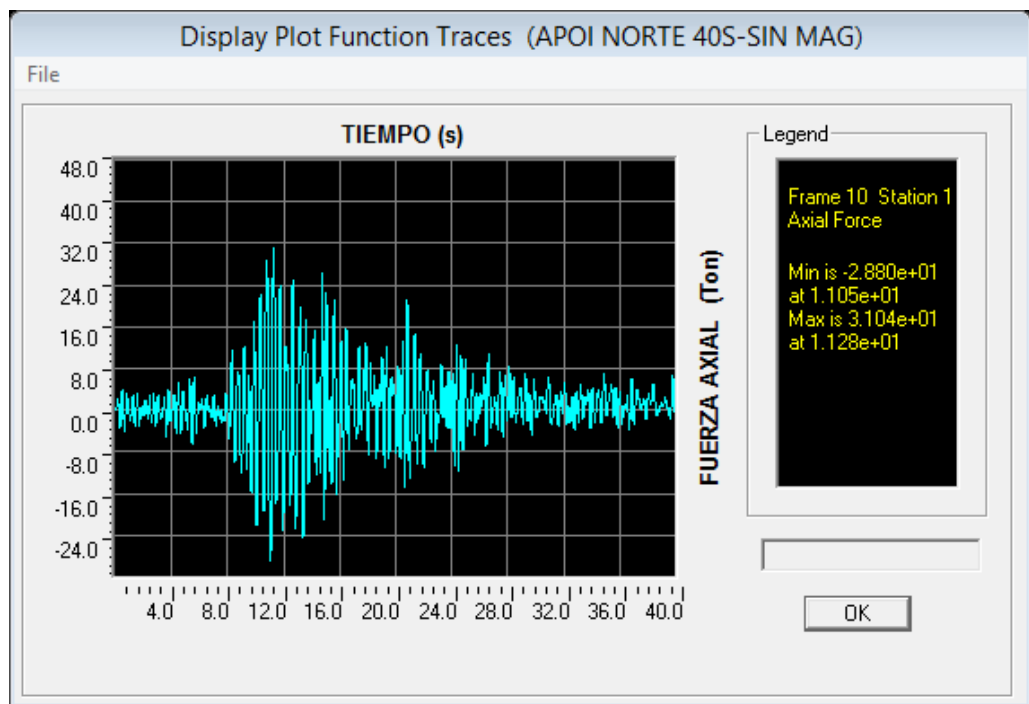


Figura 97, Fuerza axial actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

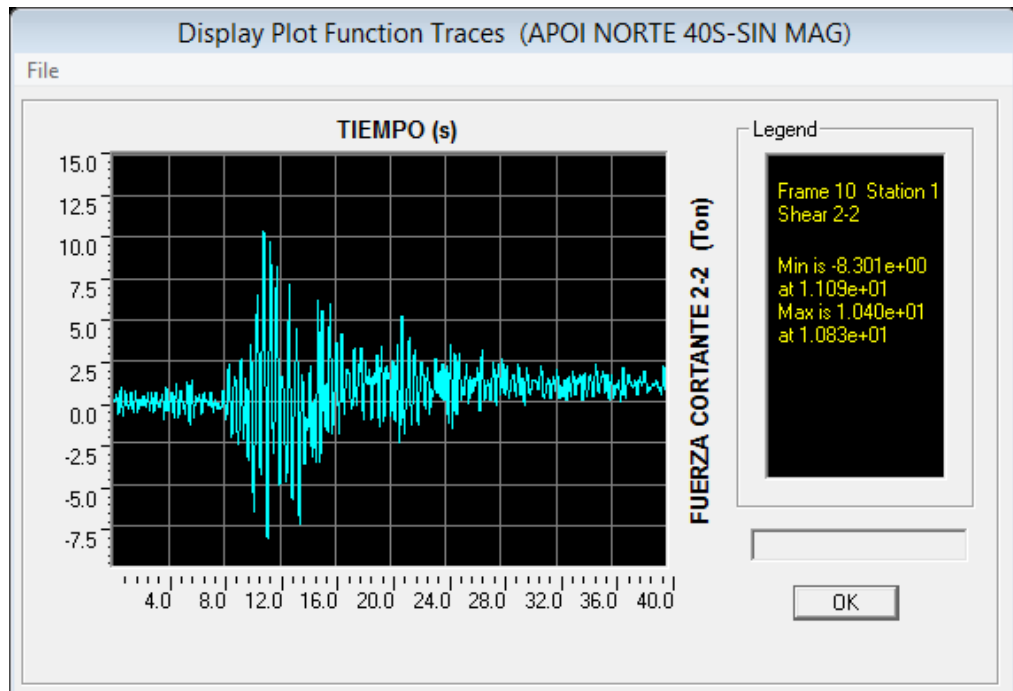


Figura 98, Cortante actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

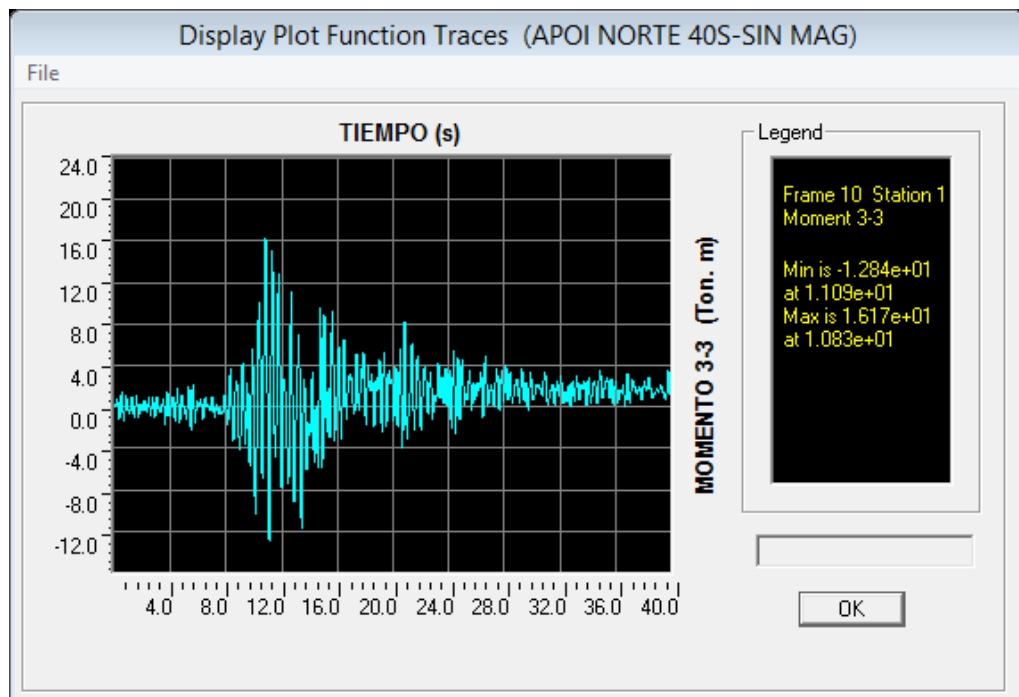


Figura 99, Momento actuante en columna 26, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

- Se observa el comportamiento de los disipadores de energía friccionales aplicados en este modelo en la figura 100, con una fuerza de 60 toneladas, la particularidad como se había mencionado antes es que para este tipo de acople (“con mecanismos de amplificación de desplazamientos”) la fuerza requerida se reducirá en la misma magnitud que el factor de amplificación de cada mecanismo de amplificación, es decir en el mecanismo **TOGGLE** se reducirá en 3 veces y para el mecanismo **ELAS** se reducirá 10 veces, teniendo como resultados una fuerza requerida de 20 toneladas para **TOGGLE** y para el mecanismo **ELAS** una fuerza requerida en el disipador de 6 toneladas, lo que significa un disipador menor al requerido en un acople diagonal con fuerza de 60 toneladas como se mencionaba anteriormente, disminuyendo también el costo de dicho disipador al requerir uno de menor fuerza.

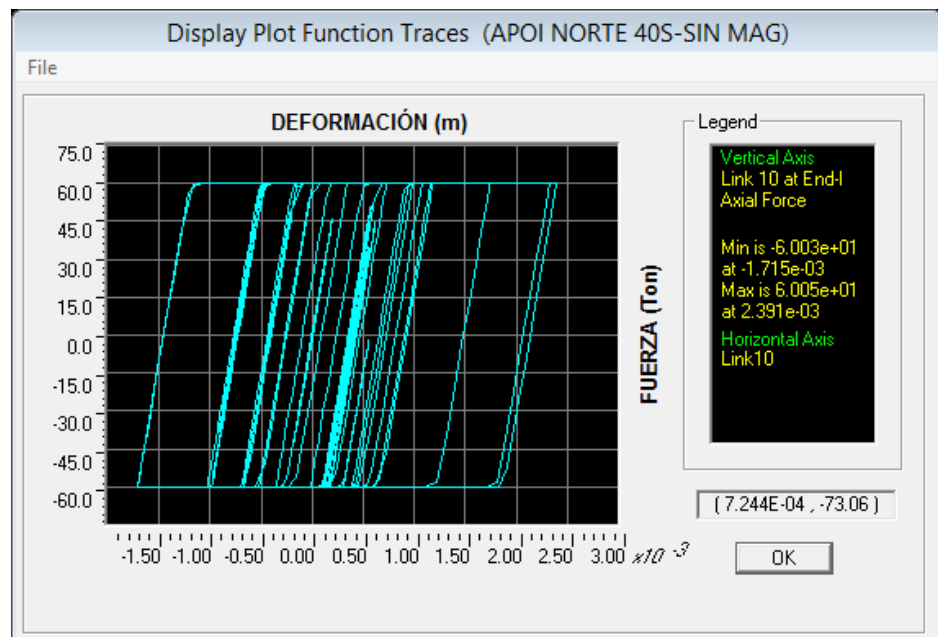


Figura 100, Ciclo de Histéresis disipador, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento “TOGGLE” – “ELAS”, SAP2000

- Según el programa SAP2000 la energía ingresada es de 422100 joules como se muestra en la figura 101 para este tipo modelo y la energía absorbida por los disipadores es igual a 64500 joules mostrada en la figura 102 la que es menor a la energía presentada según SAP2000 con un acople diagonal, pero cabe recalcar que esta energía será absorbida únicamente con disipadores de 6 toneladas en caso de un acople ELAS y de 20 toneladas en caso de acople TOGGLE, lo que significa un ahorro económico, en la figura 103 podemos ver una gráfica para observar en que magnitud afecta los disipadores en cuanto a energía.

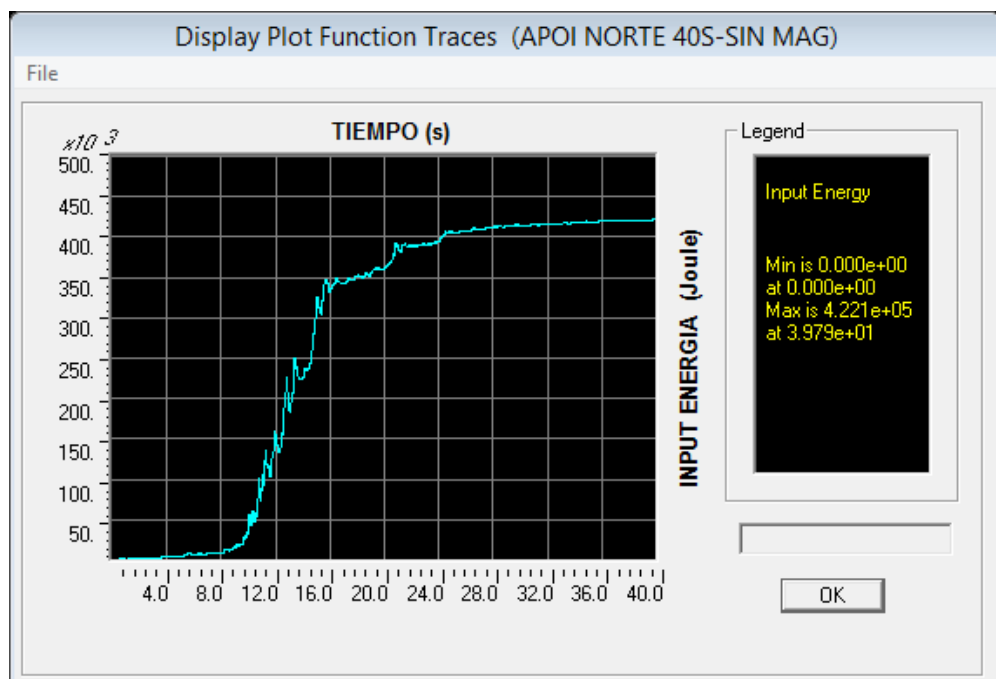


Figura 101, Energía ingresada, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

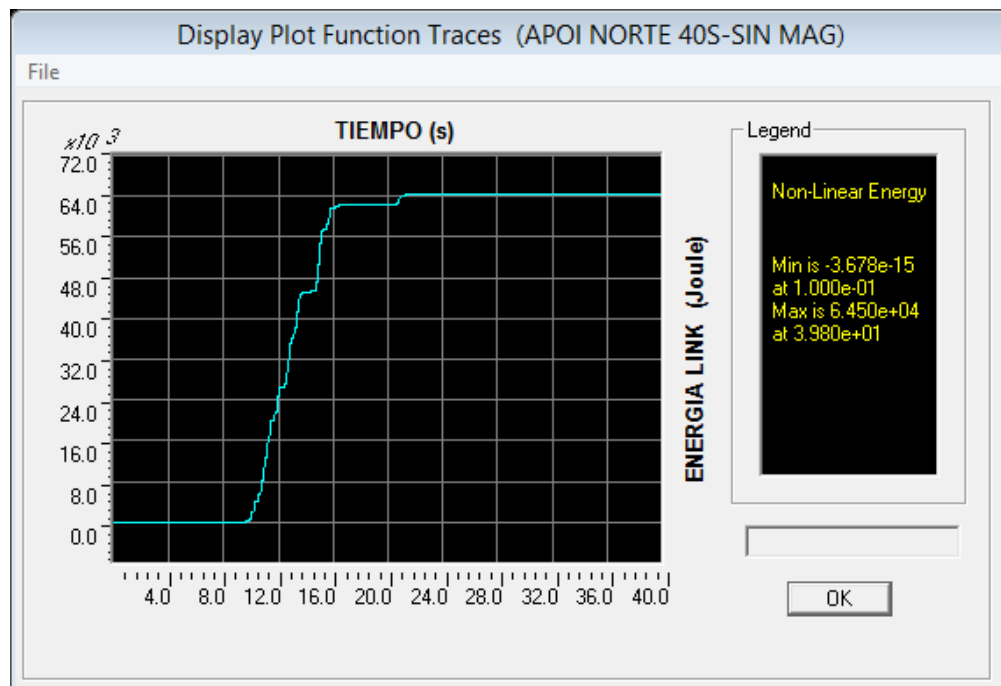


Figura 102, Energía absorbida por disipador, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

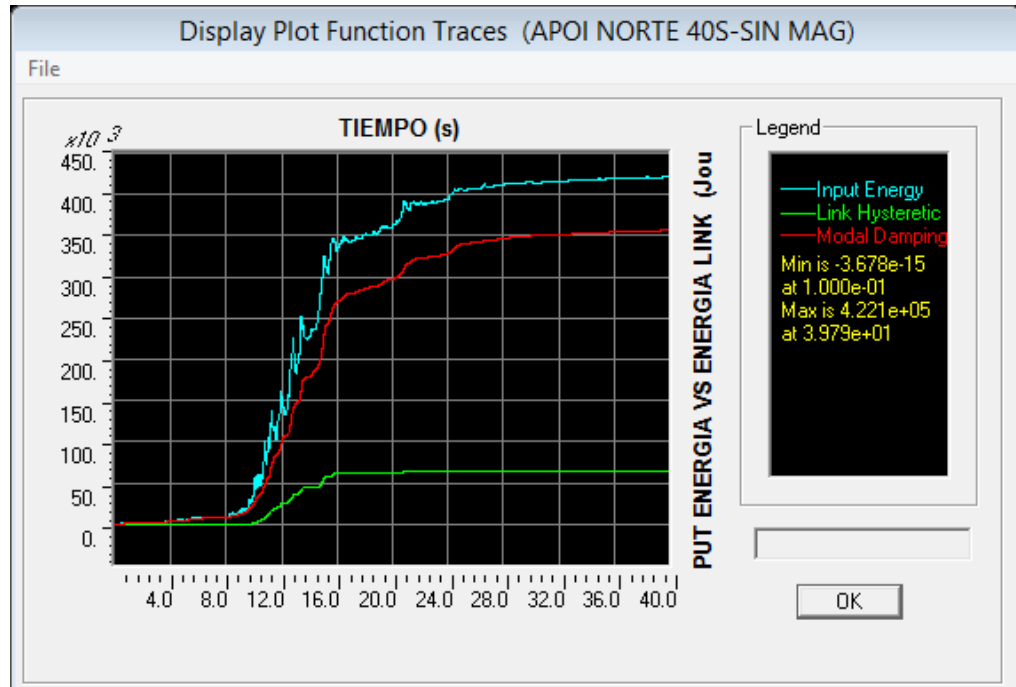
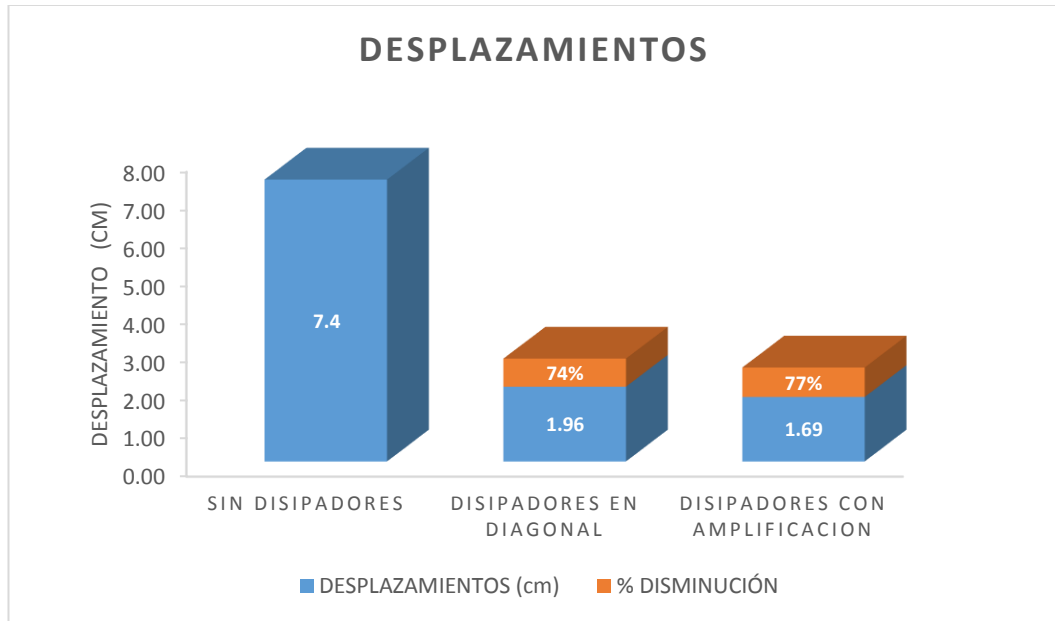
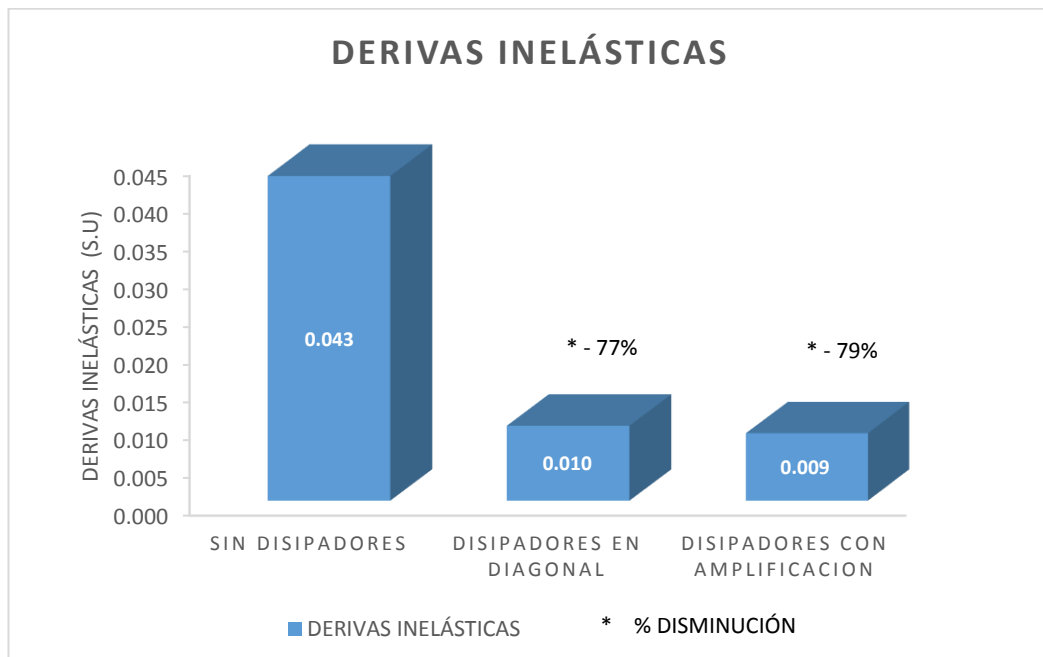


Figura 103, Comparación Energía ingresada vs energía disipador, modelo estructural con disipadores acoplado a mecanismo de amplificación de desplazamiento "TOGGLE" – "ELAS", SAP2000

**5.2. Gráficos de resumen de resultados entre los modelos con comportamiento óptimo de braces, descritos anteriormente.**



*Gráfico 1, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, desplazamientos elásticos y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores.*



*Gráfico 2, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de braces, derivas inelásticas y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores.*

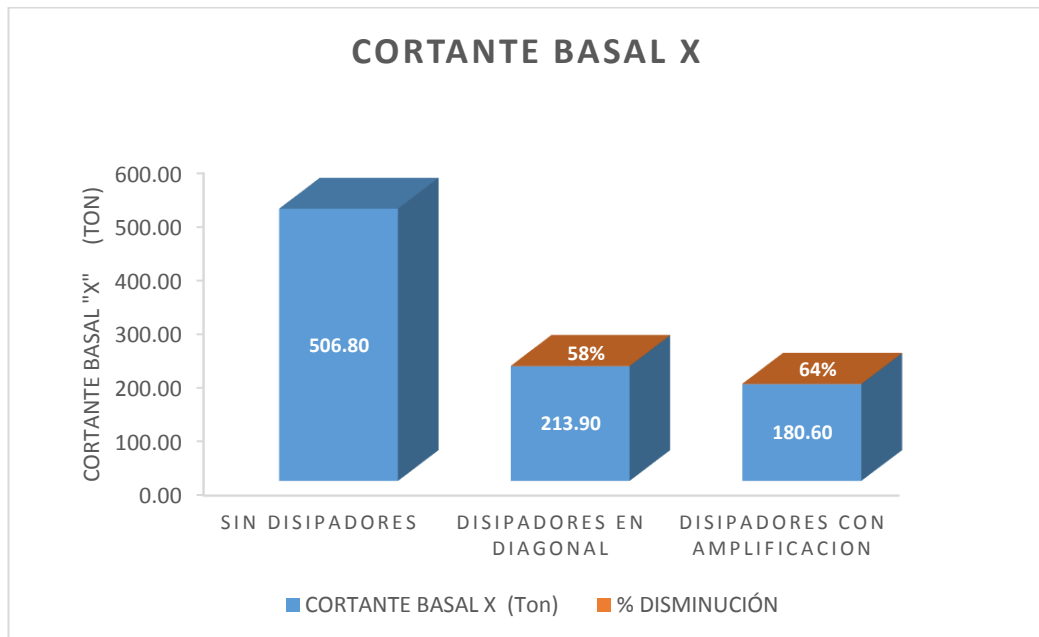


Gráfico 3, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de brces, cortante basal "x" y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores.

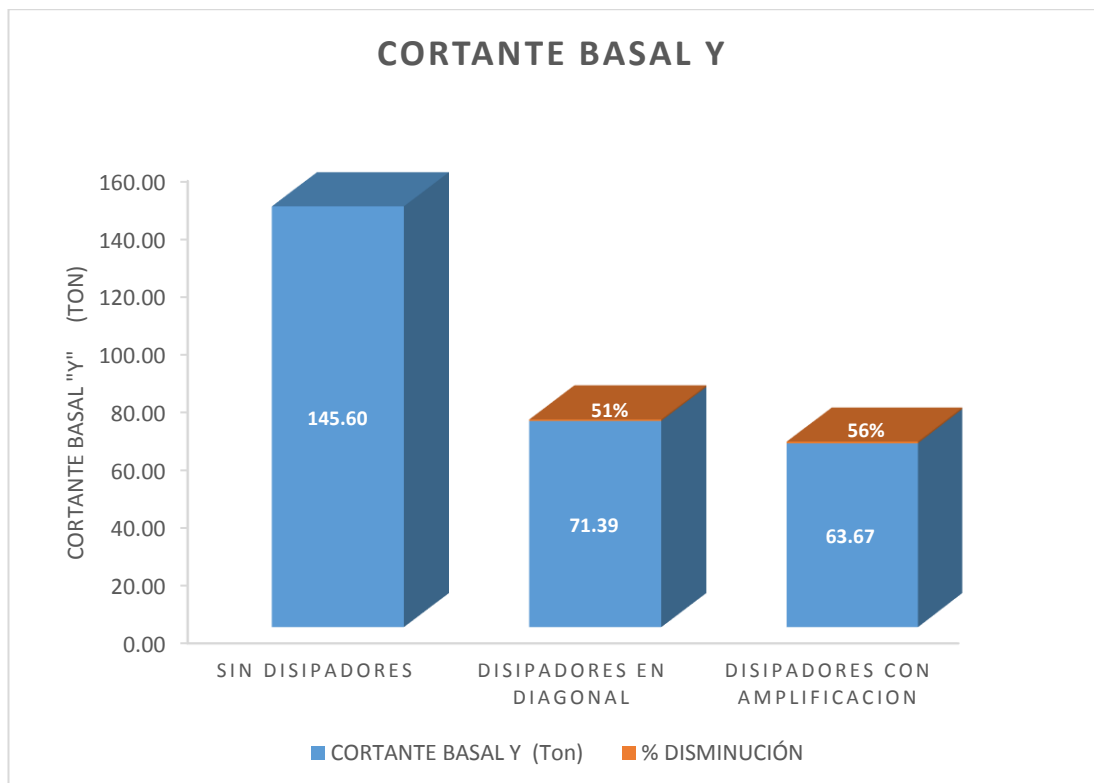


Gráfico 4, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de brces, cortante basal "y" y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores.



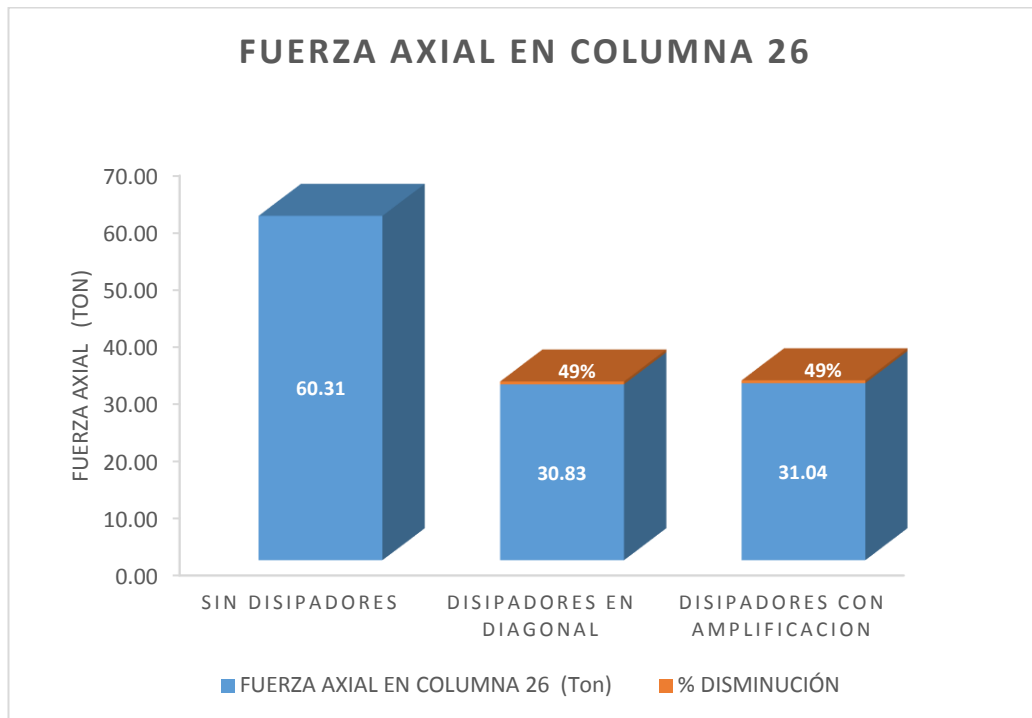


Gráfico 5, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de brces, fuerza axial actuante en columna 26 y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores.

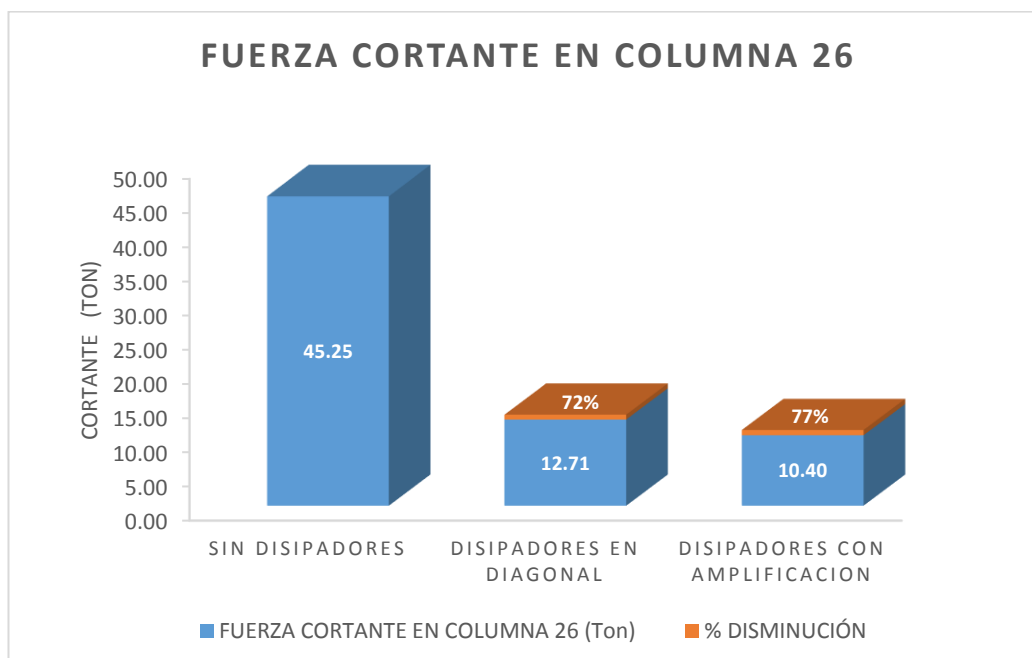


Gráfico 6, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de brces, fuerza cortante actuante en columna 26 y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores.

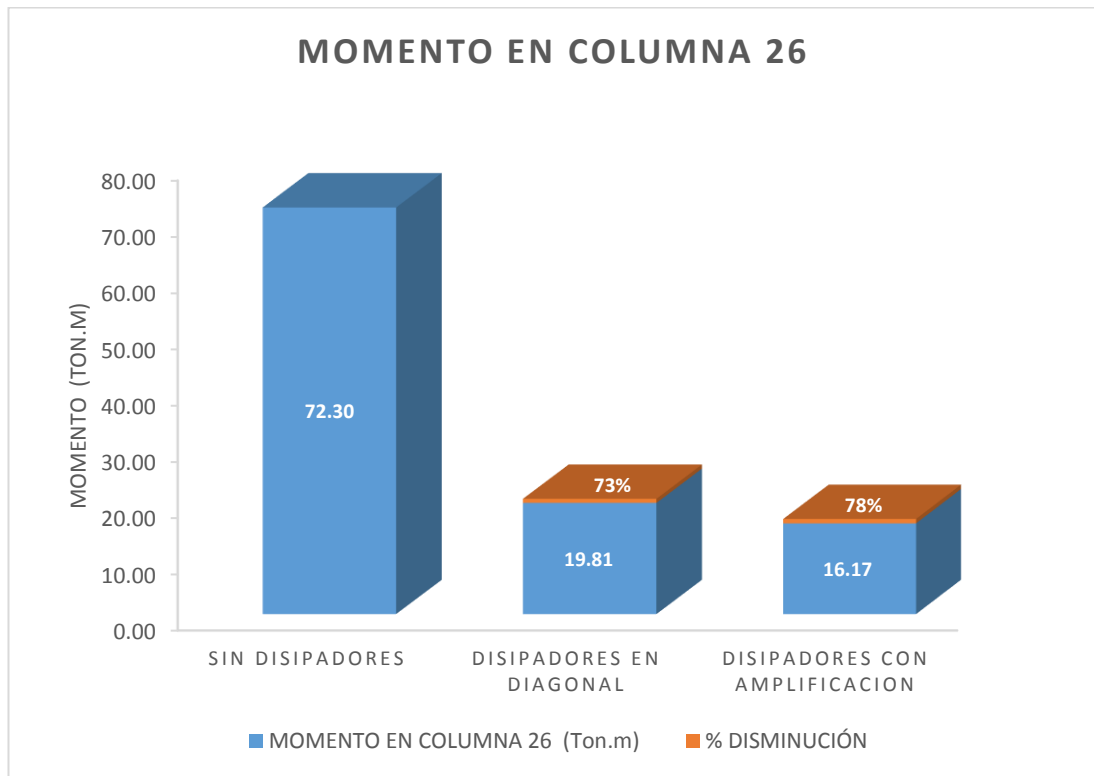


Gráfico 7, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de brces, momento actuante en columna 26 y porcentaje de disminución de cada caso referente al primer modelo sin disipadores.

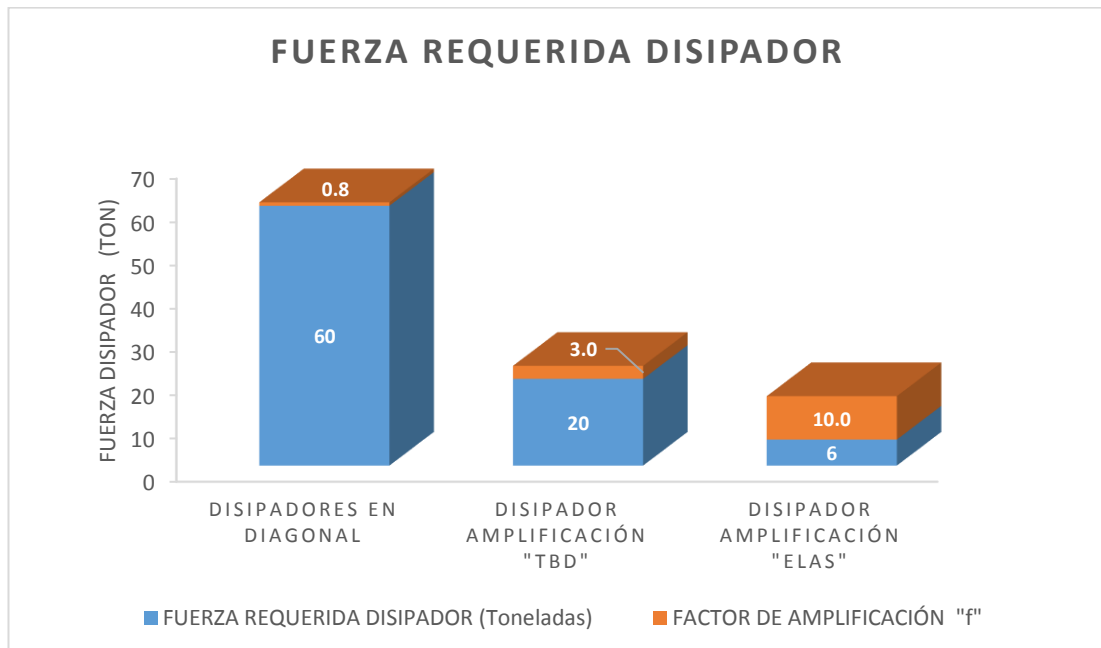


Gráfico 8, Comparación de resultados de análisis de modelos estructurales con comportamiento ideal de brces, fuerza requerida en disipador y factor de amplificación referente a cada mecanismo de acople de disipadores.

### **5.3. Análisis económico comparativo, considerando condiciones reales, entre disipadores con acople convencional en diagonal versus disipadores acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”.**

Para llevar a cabo un análisis económico se tomó en cuenta condiciones reales de brases, es decir la rigidez de estos elementos ya no se considerará infinita, para lo que se ha reducido dicha rigidez en un proceso iterativo hasta obtener derivas aceptables en los modelos con respecto a la norma ecuatoriana de la construcción.

En caso de que únicamente con la reducción de rigidez no se obtenga derivas aceptables se podrá incrementar la fuerza de plastificación, la cual simula la capacidad de cada disipador friccional, teniendo así mayor demanda de fuerza en el disipador.

Se podrá comparar entonces económicamente que sistema es conveniente con las consideraciones tomadas anteriormente.

#### **5.3.1. Análisis económico y Pre dimensionamiento en condición real de disipadores acoplados en diagonal.**

Como se mencionó, para los sistemas de protección sísmica (disipador – mecanismo de acople) de los modelos estructurales configurados anteriormente, se asumió una rigidez infinita, queriendo representar unas condiciones al 100 por ciento (sin ningún tipo de pérdida de energía), para así poder comparar entre los tres sistemas de acople y ver cuál es el más efectivo.

Al requerir una condición real, en el modelo estructural de acople en “DIAGONAL”, se disminuyó la rigidez infinita hasta obtener una rigidez con la cual se tenga derivas aceptables, dado que pese a la disminución de la rigidez no se obtuvo derivas aceptables se aumentó la fuerza o capacidad del disipador friccional.

La rigidez resultante será la rigidez axial en condiciones reales del elemento de acople o diagonal entre disipador y estructura. (QuakeTek, 2016)

$$k_{condición\ real} = k_{diagonal} = \frac{A * E}{L}$$

Donde:

$A$ ,	Área del perfil a seleccionar.
$E_s$ ,	Módulo de elasticidad del acero.
$L$ ,	Longitud de diagonal.
$K_{condición\ real}$ ,	Rigidez disminuida de braces para condición real.

La rigidez en condición real y la fuerza o capacidad de disipador friccional con la cual se obtuvo derivas aceptables fue de 28000 ton/m y de 90 ton respectivamente. Ver figura 104.

Obteniendo posterior al análisis las derivas mostradas en la tabla 6.

**Link/Support Directional Properties**

Identification

Property Name:

Direction:

Type:

NonLinear:

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness:

Effective Damping:

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness:

Yield Strength:

Post Yield Stiffness Ratio:

Yielding Exponent:

Figura 104, Rigidez equivalente utilizada para obtención de dimensiones reales de elementos ELAS

Tabla 6, Derivas de piso con modelo estructural con disipadores de energía acoplados en diagonal convencionalmente.

PUNTO MEDIO - 11.30 s			DERIVAS EN X			
PISO	ELEVACIÓN (m)	ALTURA DE ENTREPISO (cm)	$\delta_E$ máx (cm)	$\Delta_E$	$\Delta_M$	COMENTARIO
0	0	0	0	0	0	
1	3.78	378	1.1	0.003	0.017	OK
2	7.56	378	2.59	0.004	0.020	OK
3	11.34	378	3.92	0.004	0.020	OK
4	15.12	378	4.92	0.003	0.016	OK

### 5.3.1.1. Pre dimensionamiento de elementos de acople en configuración diagonal.

Para el pre dimensionamiento de acople se han tomado las siguientes consideraciones.

$$k_{condición\ real} = k_{diagonal} = 28000\ ton/m$$

$$E = 21000000\ ton/m^2$$

$$L = 7\ m$$

Por lo tanto, con los datos mostrados anteriormente se podrá obtener el área o sección necesaria de un perfil, como se muestra a continuación.

$$k_{condición\ real} = k_{diagonal} = \frac{A * E}{L} = 28000\ t/m$$

Despejando

$$A_{requerida} = \frac{7\ m * 28000\ t/m}{21000000\ t/m^2} = 0.00933\ m^2 = 14.46\ in^2$$

Un perfil HSS 14 x 14 x 5/16 (in) con un área de  $15.7\ in^2$  y un peso de 57.31 lb/ft o de 85.46 kg/m, sería escogido como elemento de acople, ver figura 105.

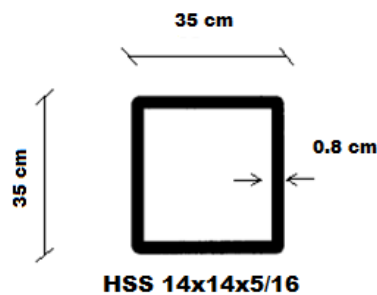


Figura 105, Elemento de acople para una configuración en diagonal, en condición real.

#### **5.3.1.2. Análisis económico de disipadores acoplados en diagonal.**

Para calcular el costo del mecanismo de acople o diagonales se ha obtenido el metraje total requerido el cual es de 180 metros teniendo esto un peso total de 15 382.8 kg, con un costo de acero A36 de 0.96 \$/kg según la revista de la cámara de la construcción, el cual únicamente se refiere al costo del material; se requieren \$ 14 767.48 para diagonales. (CAMICON, 2016)

En cuanto al costo de los disipadores en conversaciones con la empresa con CDV se había informado que el costo de un disipador con una capacidad de 60 toneladas tenía un costo de alrededor de \$ 4 000.00 por lo que se estima que un disipador de 90 toneladas oscilará entre los \$ 6 000.00, en la modelación se requieren 24 disipadores, por lo que esto tendría un costo total de \$ 144 000.00.

El costo de disipadores más mecanismo de acople o diagonales es igual a la suma de los dos valores obtenidos anteriormente que es igual a \$ 158 800.00.

### 5.3.2. Análisis económico y Pre dimensionamiento en condición real de disipadores acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”.

Se mencionó anteriormente, que los disipadores que utilicen mecanismos de amplificación serán sustituidos por un acople tipo diagonal sin amplificación, para lo cual se deberá encontrar una rigidez equivalente (desarrollada en el anexo 3), para que este acople diagonal simule las características de un mecanismo de amplificación de desplazamientos como lo son “ELAS” y “TOGGLE”.

Al requerir una condición real, en el modelo estructural “ELAS”, se disminuyó la rigidez infinita hasta obtener una rigidez con la cual se tenga derivas aceptables, siendo esta la rigidez equivalente con la cual se obtienen las rigideces de los elementos de un mecanismo tipo “ELAS” como se muestra en la siguiente expresión.

$$k_{eq} = \frac{\alpha_{tg}^2 * k_l k_d}{(\alpha + 1)^2 k_l + k_d}$$

Donde:

$\alpha$ , Relación entre b/a, siendo “a” la longitud existente entre el nudo de la estructura y el acople de la diagonal, la longitud de la palanca restante es “b”, como se muestra en la figura 106.

$k_l$ , Es la rigidez de la palanca.

$k_d$ , Es la rigidez de la diagonal.



$\alpha_{tg}$ , Factor de amplificación de mecanismo.

$$\alpha_{tg} = (\alpha + 1) \frac{\cos \theta \cos \beta}{\cos(\beta + \theta)} - 1, \text{ ver figura 98}$$

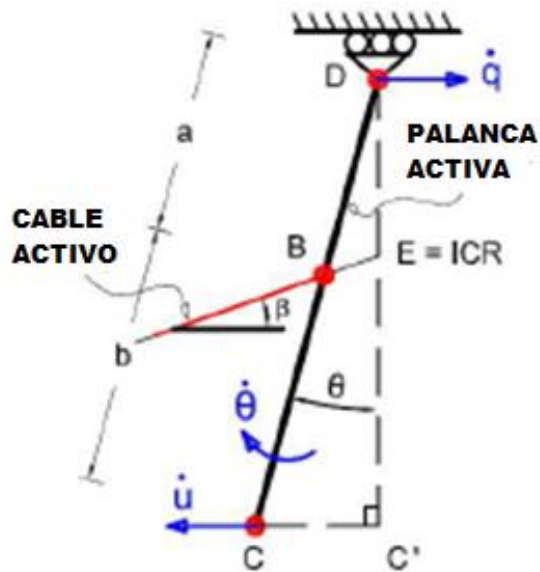


Figura 106, Configuración palanca-diagonal en mecanismo ELAS, (Baquero & Almaz, 2015)

La rigidez equivalente ingresada en el modelo es igual a 28000 t/m como se muestra en la figura 107, mediante la cual se obtuvieron las derivas mostradas en la tabla 7.

**Link/Support Directional Properties**

Identification

Property Name: ELAS x

Direction: U1

Type: Plastic (w/en)

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 28000.

Effective Damping: 0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 28000.

Yield Strength: 60.

Post Yield Stiffness Ratio: 1.000E-04

Yielding Exponent: 20.

OK Cancel

Figura 107, Rigidez equivalente utilizada para obtención de dimensiones reales de elementos ELAS

Tabla 7, Derivas de piso, modelo estructural con disipadores acoplado con mecanismo ELAS, con rigidez equivalente.

PUNTO MEDIO - 11.30 s			DERIVAS EN X			
PISO	ELEVACIÓN	ALTURA DE ENTREPISO	$\delta_{E\text{ máx}}$	$\Delta_E$	$\Delta_M$	COMENTARIO
	(m)	(cm)	(cm)			
0	0	0	0	0	0	
1	3.78	378	1.04	0.003	0.017	OK
2	7.56	378	2.45	0.004	0.020	OK
3	11.34	378	3.77	0.003	0.020	OK
4	15.12	378	4.79	0.003	0.016	OK

### 5.3.2.1. Pre dimensionamiento de elementos de acople en configuración “ELAS”.

Para el cálculo de las dimensiones de los elementos de una configuración ELAS, se han asumido los siguientes datos:

$\theta = 5.12$  y  $\beta = 28.8$ , ángulos de configuración de palanca y diagonal.

$k_l = 2500 \text{ t/m}$ , rigidez de la palanca

$$E = 21\,000\,000 \frac{\text{t}}{\text{m}^2}$$

$$\alpha = \frac{b}{a} = 10$$

*long. palanca* ( $l_p$ ) = 3.3 m

*long. diagonal* ( $l_d$ ) = 7.0 m

Entonces:

$$\alpha_{tg} = (\alpha + 1) \frac{\cos \theta \cos \beta}{\cos(\beta + \theta)} - 1$$

$$\alpha_{tg} = (10 + 1) \frac{\cos 5.12 \cos 28.8}{\cos(5.12 + 28.8)} - 1$$

$$\alpha_{tg} = 10.57$$

$$k_{eq} = \frac{\alpha_{tg}^2 * k_l k_d}{(\alpha + 1)^2 k_l + k_d} = \frac{10.57^2 * 2500 * k_d}{(10 + 1)^2 * 2500 + k_d} = 28000 \text{ t/m}$$

Resolviendo,

$$k_d = 33703.1 \text{ t/m}$$

#### 5.3.2.1.1. Dimensionamiento elemento Diagonal “ELAS”.

Como la diagonal va a funcionar únicamente a tensión, es decir tendrá una rigidez axial, entonces:

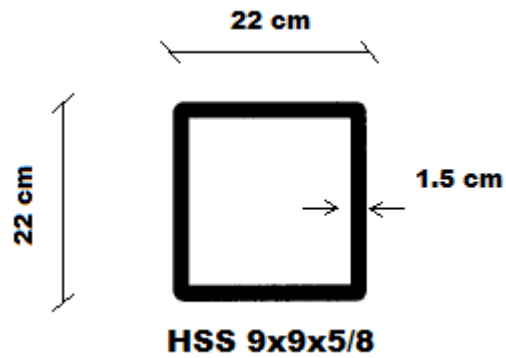
$$k_d = \frac{A_d * E}{L_d} = 33703.1 \text{ t/m}$$

$$A_d = \frac{33703.1 \text{ t/m} * 7.0 \text{ m}}{21000000 \text{ t/m}^2} = 0.011234 \text{ m}^2 = 17.41 \text{ in}^2$$

Si consideraríamos el uso de una barra como diagonal esta tendría un diámetro de:

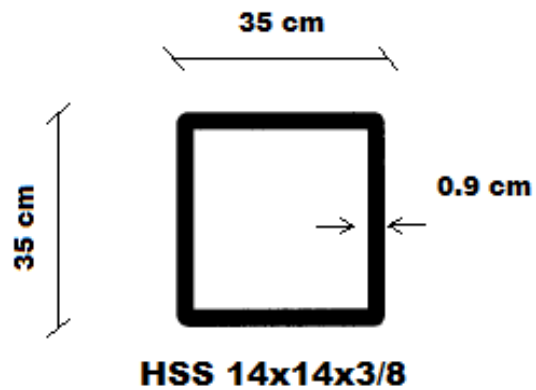
$$D_d = \sqrt{\frac{4 * 0.011234 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.119 \text{ m}$$

Lo que significa que se deberá colocar una barra sólida de 11.9 cm de diámetro, lo que es impracticable, buscando una solución se propone el uso de un perfil tipo HSS 9x9x5/8 como una alternativa, teniendo características como un área de 18.7 in<sup>2</sup> equivalente al área requerida y con un peso de 67.62 lb/ft o 100.84 kg/m, ver figura 108.



*Figura 108, Elemento de acople en configuración "ELAS", elemento diagonal.*

Como una alternativa también se puede utilizar el perfil HSS 14x14x3/8 con un peso de 68.24 lb/ft o 101.76 kg/m, mostrado a continuación en la figura 109, ya que cumple con las características requeridas.



*Figura 109, Alternativa de elemento diagonal en configuración "ELAS".*

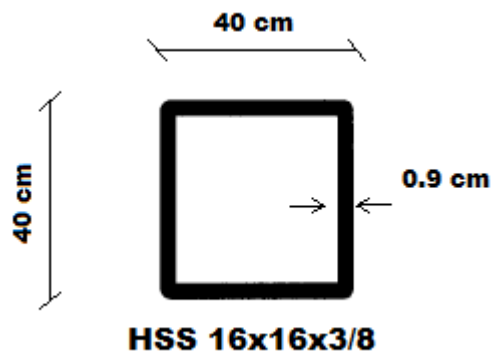
#### **5.3.2.1.2. Dimensionamiento elemento Palanca "ELAS".**

Para el cálculo de las dimensiones de la palanca, se considera que en esta gobierna la siguiente expresión de rigidez:

$$k_l = \frac{12 * E * I}{L^3} = 2500 \text{ t/m}$$

$$I = \frac{(2500) \text{ t/m} * (3.3^3) \text{ m}}{12 * (21000000) \text{ t/m}^2} = 0.000356 \text{ m}^4 = 856.53 \text{ in}^4$$

Se buscó un perfil que tenga estas características, encontrando un perfil HSS con la misma inercia requerida calculada anteriormente, el perfil escogido es HSS 16 x 16 x 3/8 con una inercia de 873 in<sup>4</sup> equivalente a la inercia requerida y con un peso de 78.45 lb/ft o 116.99 kg/m, ver figura 110.



*Figura 110, Elemento tipo palanca en configuración "ELAS", en condiciones reales.*

#### **5.3.2.2. Análisis económico de disipadores acoplados con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”.**

Para el elemento de acople diagonal el metraje total requerido es de 176 metros, teniendo esto un peso total de 17 747.84 kg, con un costo de acero A36 de 0.96 \$/kg según la revista de la cámara de la construcción, tomando en cuenta que ese costo es únicamente del material, se requieren \$ 17 037.92 para diagonales.(CAMICON, 2016)

El metraje total requerido para el elemento de acople tipo palanca es de 80 metros, teniendo un peso total de 9 359.2 kg, con un costo de acero A36 de 0.96 \$/kg según la revista de la cámara de la construcción, tomando en cuenta que ese costo es únicamente del material, se requieren \$ 8 984.83 para estos elementos.

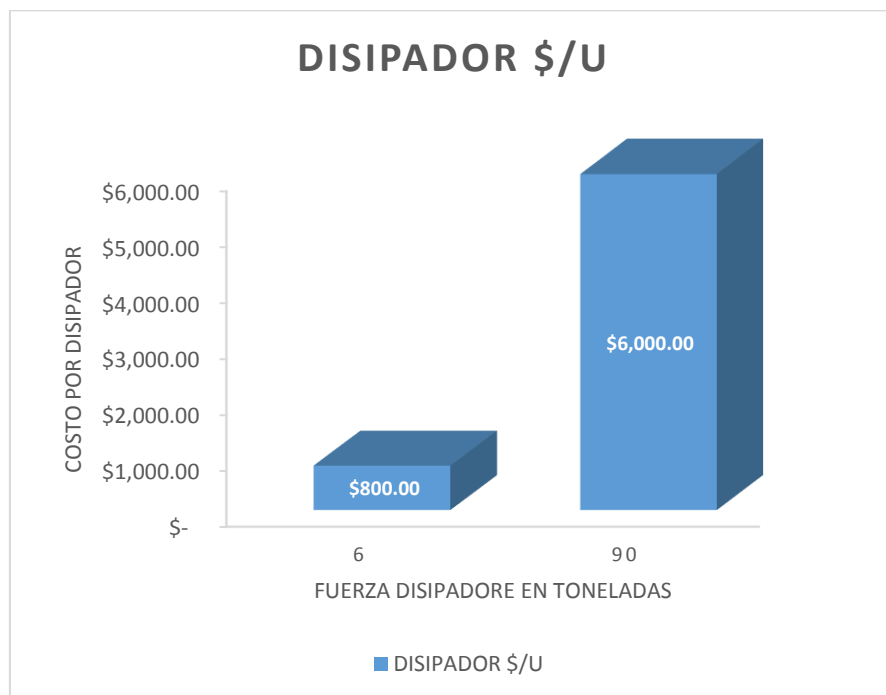
Los disipadores tendrán un diferente costo con la utilización de este tipo de mecanismos de acople, ya que se reducirá la fuerza requerida del disipador en la misma magnitud que el factor de amplificación que el mecanismo de amplificación de desplazamientos, teniendo entonces “ELAS” un factor de amplificación de 10 y al requerir según el modelo convencional en diagonal una fuerza de 60 toneladas, con la utilización de “ELAS” la fuerza requerida será de 6 toneladas, teniendo estos un costo aproximado de \$ 800.00, según el modelo estructural se requieren 24 disipadores, teniendo un costo total de \$ 19 200.00.

El costo de disipadores más mecanismo de acople o “ELAS” es igual a la suma de los valores obtenidos anteriormente que es igual a \$ 45 200.00.

*Tabla 8, Resumen costo de mecanismo de acople*

TIPO	DESCRIPCIÓN	PESO/U	CANTIDAD	PESO TOTAL	COSTO/U	COSTO TOTAL
		kg/m	m	kg	\$/kg	\$
HSS 9x9x5/8	DIAGONALES	100.84	176.00	17747.84	0.96	\$ 17,037.93
HSS 16x16x3/8	PALANCAS	116.99	80.00	9359.20	0.96	\$ 8,984.83
TOTAL						\$ 26,022.76

**5.3.3. Gráficas comparativas del resultado de un análisis económico entre una estructura con el uso de disipadores acoplados en diagonal versus un acople con mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS”.**



*Gráfico 9, Comparación económica entre disipadores según su fuerza o capacidad.*



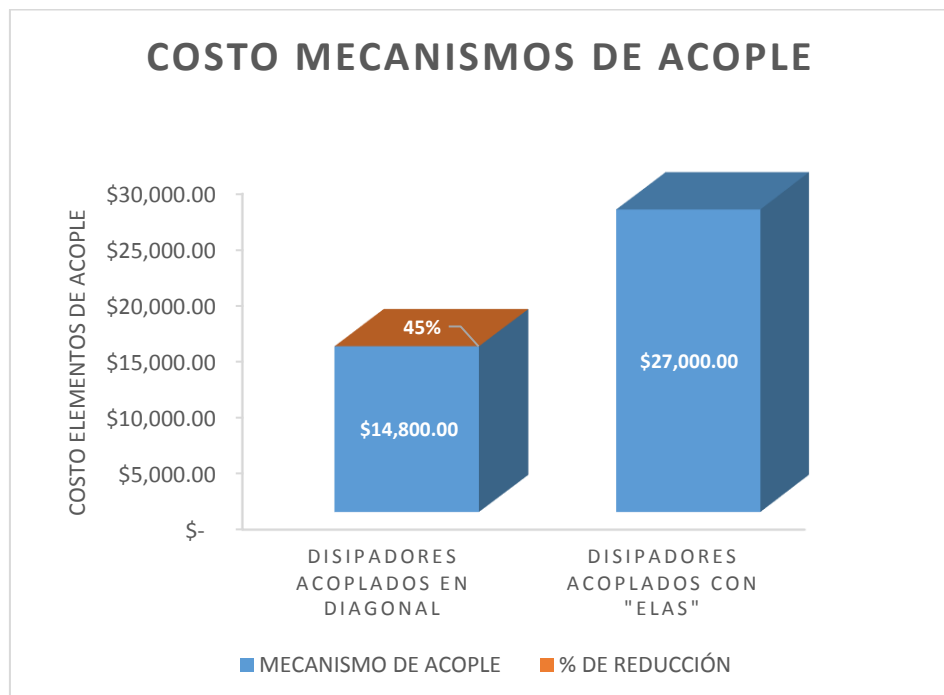


Gráfico 10, Comparación económica entre los mecanismos de acople a desarrollarse.

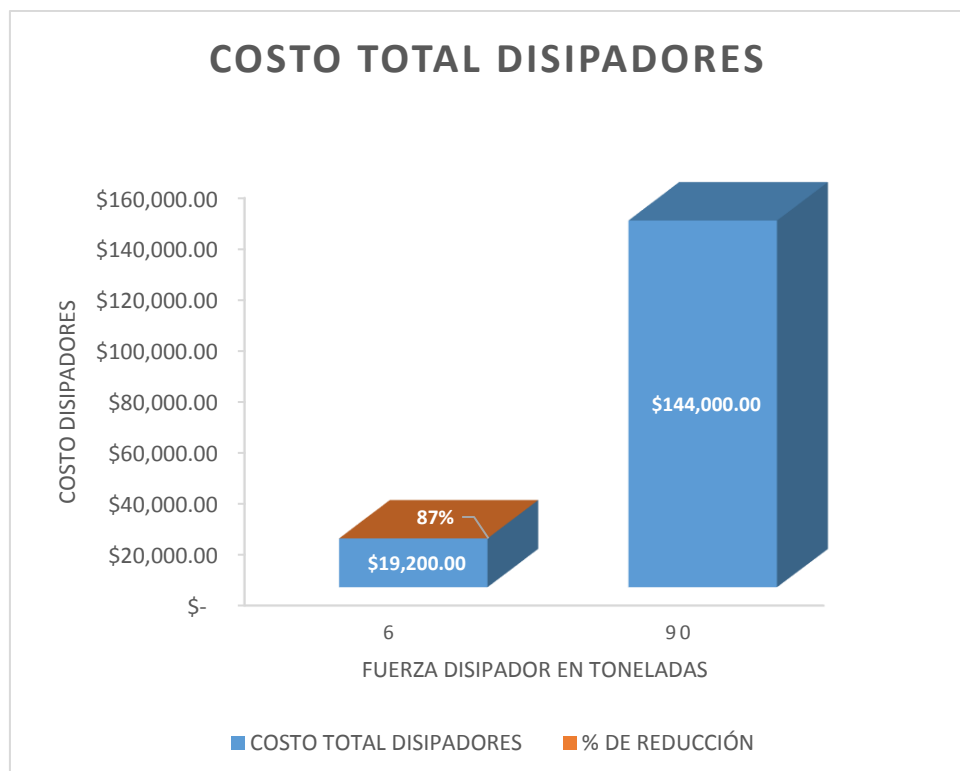


Gráfico 11, Comparación del costo total requerido para disipadores en el edificio del antiguo banco central, según la capacidad necesaria de cada disipador.

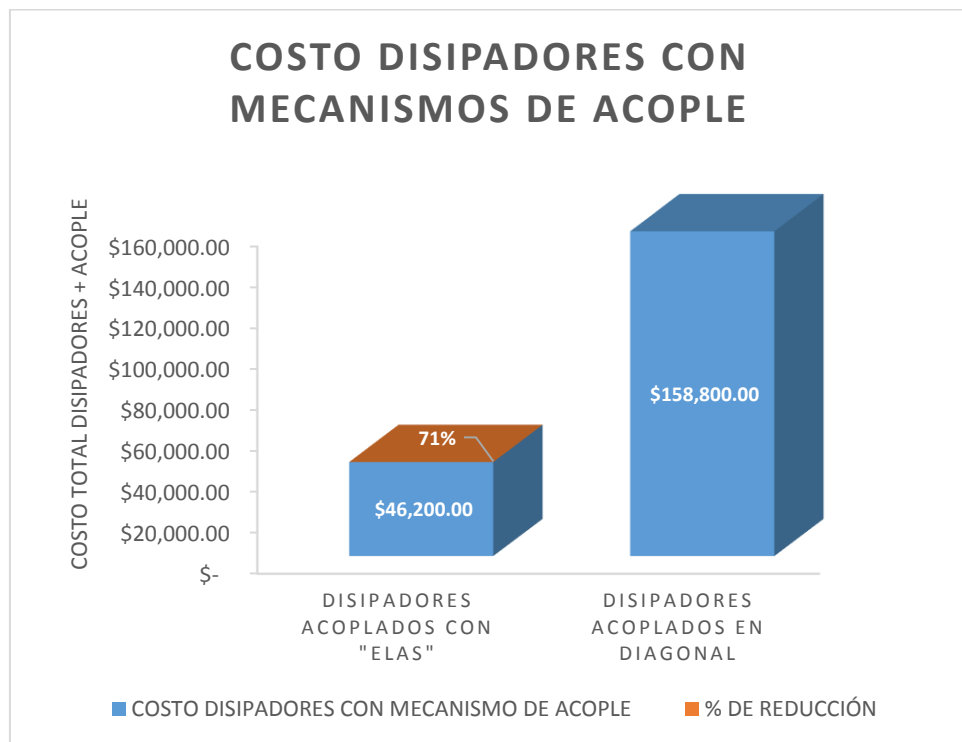
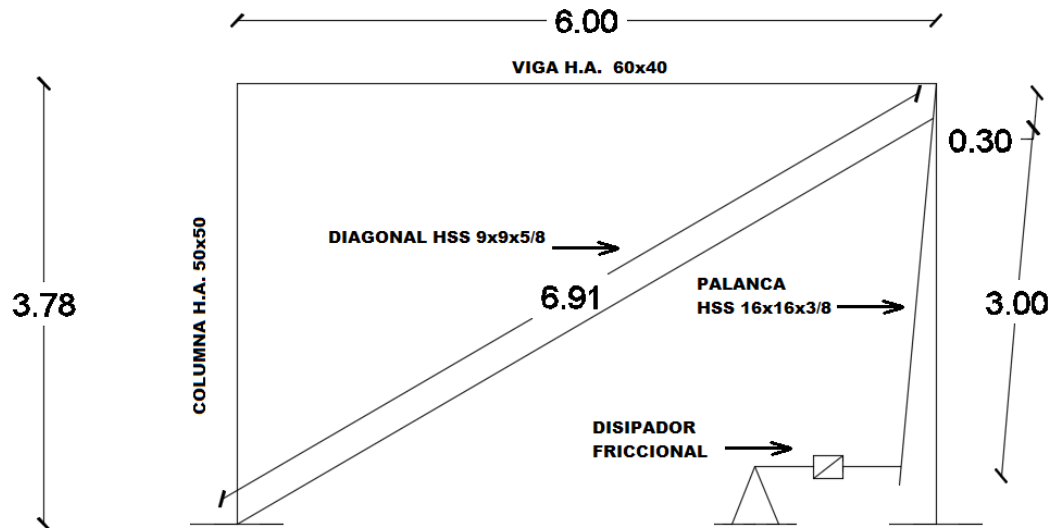


Gráfico 12, Comparación económica entre la utilización de mecanismos de acople en diagonal y "ELAS".

#### 5.4. Costo total del proyecto

En conversaciones con la empresa CDV se mencionó que el costo de la utilización de disipadores se encuentra entre el 1 y el 3 % del costo total del proyecto, esto sin la aplicación de mecanismos de amplificación de desplazamientos, se podrá concluir que con la aplicación de mecanismos de desplazamientos el costo será menor al mencionado anteriormente.<sup>6</sup>

**5.5. Esquema de acople disipador – estructura, aplicando mecanismos de amplificación de desplazamientos “ELAS” en condiciones reales.**



*Figura 111, Esquema de acople disipador - estructura, aplicando un mecanismo de amplificación de desplazamientos "ELAS"*

## **CAPÍTULO VI**

### **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

- Con los resultados obtenidos del programa SAP2000, podemos observar que las derivas máximas disminuyeron de 0.043 a 0.01 con la aplicación de disipadores de energía sin ningún tipo de amplificación, es decir en un 77 por ciento, disminuyen aún más cuando estos disipadores son instalados mediante mecanismos de amplificación de desplazamientos teniendo derivas de 0.009 teniendo una reducción del 79 por ciento.
- También se pudo observar con la aplicación de disipadores la disminución de fuerzas actuantes en los elementos estructurales, en este caso se tomó como ejemplo la columna “26” teniendo como resultado que sin ningún tipo de disipación estaba sometida a una carga axial de 60.31 toneladas, llegando a tener un valor de 30.83 toneladas con la aplicación de disipadores en forma diagonal sin amplificación, no se ve ningún decremento en cuanto a fuerza axial con la aplicación de mecanismos de amplificación de desplazamientos, obteniendo un valor de 31.04 toneladas.
- La refuerza requerida en el disipador con un mecanismo convencional de acople “diagonal” es de 90 toneladas en condiciones reales, con la utilización de mecanismos de amplificación como acople de disipadores las fuerzas requeridas disminuirán en la misma magnitud que su factor de amplificación, llegando a obtener una fuerza de 20 toneladas para el caso de “TOGGLE-BRACE SYSTEM” y de 6 toneladas para la utilización de “ECCENTRIC-LEVER-ARM SYSTEM (ELAS)”.

- Los costos para un sistema sin amplificación tomando únicamente en cuenta los disipadores (no los elementos de configuración), están alrededor de \$ 144 000.00 pero se obtiene una disminución sustancial en el costo con la aplicación de “ELAS” llegando a tener un valor aproximado de \$ 20 000.00, teniendo una reducción del 87%.
- La energía absorbida por cada disipador en un sistema de acople diagonal convencional sin amplificación es de 96200 Joules y con un disipador acoplado a la estructura mediante mecanismos de amplificación de desplazamientos es de 64500 Joules, teniendo menor energía, pero los mismos resultados, aumentando su funcionalidad al disminuir la fuerza requerida de disipador.
- Se recomienda el uso de disipadores de energía para disminuir la energía inelástica que disipan normalmente los elementos estructurales, para un edificio de hormigón armado debido a sus bajos desplazamientos es recomendable colocar los disipadores con mecanismos de amplificación de desplazamientos, para obtener una mayor eficiencia en dichos disipadores.
- Se puede reducir de gran manera los costos con la utilización del mecanismo de amplificación de desplazamientos “ELAS” gracias a su alto factor de amplificación que reduce las fuerzas requeridas en los disipadores, disminuyendo el volumen de los mismos, así como su costo.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

American Concrete Institute. (2011). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-11) y Comentario*.

Baquero, J., & Almaz, L. (2015). Amplification System for Concentrated And Distributed Energy Dissipation Devices, (ii), 1–23. <http://doi.org/10.1002/eqe>

Baquero Mosquera, J. S. (2015). *Sistema de amplificación para dispositivos distribuidos de disipación de energía*.

BSSC. (2003a). *NEHRP Recommended Provisions*. Whashington, D.C.

BSSC. (2003b). *NEHRP Recommended Provisions (COMMENTARY)*.

CAMICON. (2016). Construcción. *NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2016*.

CAMICON, & MIDUVI. (2015a). *Cargas (no sísmicas)*.

CAMICON, & MIDUVI. (2015b). *Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC: NEC-SE-DS - Peligro Sísmico/Diseño Sismo Resistente*. Quito.

Cassano, A. M. (2009). *ACCIONES DINÁMICAS*.

Choi, H., & Kim, J. (2010). New installation scheme for viscoelastic dampers using cables, *1211*, 1201–1211. <http://doi.org/10.1139/L10-068>

Computers and Structures Inc. (2015). *CSI Analysis Reference Manual*, 496.

Constantinou, B. M. C., Tsopelas, P., Member, A., Hammel, W., Sigaher, A. N., & Member, S. (2001). *Toggle-Brace-Damper Seismic Energy Dissipation*

Systems, (February), 105–112.

Construir. (2015). Disipadores de energía para mejorar la sismorresistencia. *El Comercio*. Retrieved from <http://www.elcomercio.com/tendencias/sismos-energia-sismorresistencia-arquitectura-edificios.html>

Dr. Villareal, G., & M.Sc. Oviedo, R. (2009). *Edificaciones con disipadores de energía*.

Eeri, M., Constantinou, M. C., & Eeri, M. (2003). Scissor-Jack-Damper Energy Dissipation, *19*(1), 133–158. <http://doi.org/10.1193/1.1540999>

Lewandowski, C. M., Co-investigator, N., & Lewandowski, C. M. (2015). *Dinámica de Estructuras Anil K. Chopra. The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference* (Vol. 1). Monterrey. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Más hoteles y edificios para oficinas surgen en Guayaquil. (2012). *El Universo*, 1. Retrieved from <http://www.eluniverso.com/2012/11/05/1/1356/mas-hoteles-edificios-oficinas-surgen-guayaquil.html>

McCormac, J. C. (2005). *Diseño de Concreto Reforzado*. (Alfaomega, Ed.) (5th ed.). México.

Ortiz Panchi, Ó. C. (2013). Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador, 46. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1221/1/T-SENESCYT-000352.pdf>

QuakeTek. (2016). Seismic Design with Friction Dampers. Retrieved from

<http://www.quaketek.com/seismic-design>

Ribakov, Y., Reinhorn, A. M., & Asce, F. (2003). Design of Amplified Structural Damping Using Optimal Considerations, (October), 1422–1427.

STRUCTURAL ENGINEERING INSTITUTE. (2010). *A S C E S T A N D A R D Loads for Buildings*.

Symans, M. D., Asce, A. M., Charney, F. A., Asce, F., Whittaker, ; A S, Asce, M., ... Mcnamara, R. J. (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 3–21. [http://doi.org/10.1061/ASCE0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](http://doi.org/10.1061/ASCE0733-9445(2008)134:1(3))



## ANEXOS

### ANEXO 1 “TABLA FEMA 356, VIGAS CONCRETO”

**Table 6-7 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams**

Conditions	Modeling Parameters <sup>3</sup>			Acceptance Criteria <sup>3</sup>						
	Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians						
				Performance Level						
				IO	Component Type					
					Primary		Secondary			
	a	b	c		LS	CP	LS	CP		
i. Beams controlled by flexure <sup>1</sup>										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf. <sup>2</sup>	$\frac{V}{b_w d_s \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01
ii. Beams controlled by shear <sup>1</sup>										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span <sup>1</sup>										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint <sup>1</sup>										
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03

1. When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occur for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.
2. “C” and “NC” are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops ( $V_p$ ) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming.
3. Linear interpolation between values listed in the table shall be permitted.

## ANEXO 2, “TABLA FEMA 356, COLUMNAS CONCRETO”

### Chapter 6: Concrete

**Table 6-8 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns**

Conditions	Modeling Parameters <sup>4</sup>			Acceptance Criteria <sup>4</sup>						
	Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians						
				Performance Level						
				IO	Component Type					
					Primary		Secondary			
	a	b	c		LS	CP	LS	CP		
i. Columns controlled by flexure <sup>1</sup>										
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Trans. Reinf. <sup>2</sup>	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.1	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.015	0.02	0.02	0.03
≤ 0.1	C	≥ 6	0.016	0.024	0.2	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
≥ 0.4	C	≤ 3	0.015	0.025	0.2	0.003	0.012	0.015	0.018	0.025
≥ 0.4	C	≥ 6	0.012	0.02	0.2	0.003	0.01	0.012	0.013	0.02
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.006	0.015	0.2	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.005	0.012	0.2	0.005	0.004	0.005	0.008	0.012
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.003	0.01	0.2	0.002	0.002	0.003	0.006	0.01
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.002	0.008	0.2	0.002	0.002	0.002	0.005	0.008
ii. Columns controlled by shear <sup>1,3</sup>										
All cases <sup>5</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	.0030	.0040
iii. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height <sup>1,3</sup>										
Hoop spacing ≤ d/2	0.01	0.02	0.4	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.02	
Hoop spacing > d/2	0.0	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01	
iv. Columns with axial loads exceeding 0.70P <sub>o</sub> <sup>1,3</sup>										
Conforming hoops over the entire length	0.015	0.025	0.02	0.0	0.005	0.01	0.01	0.01	0.02	
All other cases	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

- When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.
- “C” and “NC” are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops ( $V_s$ ) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming.
- To qualify, columns must have transverse reinforcement consisting of hoops. Otherwise, actions shall be treated as force-controlled.
- Linear interpolation between values listed in the table shall be permitted.
- For columns controlled by shear, see Section 6.5.2.4.2 for acceptance criteria.

### ANEXO 3, “DESARROLLO RIGIDEZ EQUIVALENTE (ELAS-DIAGONAL)”

#### RIGIDEZ EQUIVALENTE DE “ELAS”

Reemplazaremos el mecanismo de amplificación para una mayor facilidad de análisis con un mecanismo de acople convencional sin amplificación.

Reemplazo de mecanismo de amplificación con mecanismo de acople convencional sin amplificación.

1. Rigidez combinada del sistema diagonal-palanca correspondiente a “ELAS”.
2. Rigidez equivalente entre los sistemas.

#### 1. Sistema diagonal-palanca

Para simplificar el análisis se considera a la palanca en una posición vertical. (Baquero & Almaz, 2015)

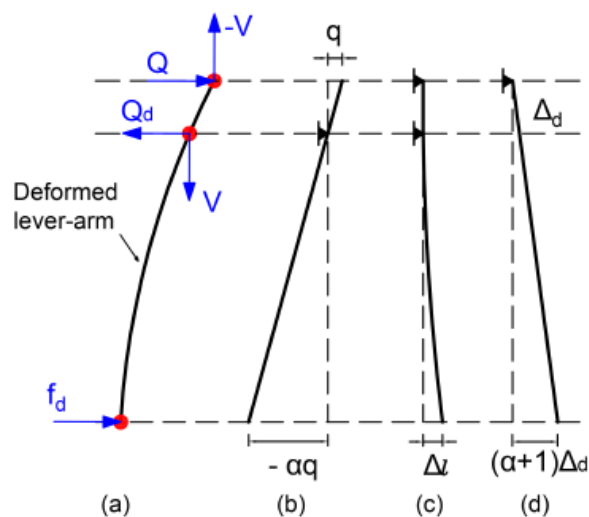


Figura 112, Componentes de deformación palanca-diagonal, (a) deformación total, (b) componente rígido, (c) componente flexible palanca, y (d) componente flexible diagonal, (Baquero & Almaz, 2015)

$$u = -\alpha q + \Delta_l + (\alpha + 1)\Delta_d$$

Donde:

$-\alpha q$ , Deformación ideal disipador, asumiendo diagonal y palanca rígidos.

$\Delta_l$ , Deformación de palanca, definido como el mínimo desplazamiento horizontal, asumiendo la diagonal infinitamente rígida.

$\Delta_d$ , Deformación horizontal de la diagonal.

$\Delta_l$  y  $\Delta_d$ , se expresan como:

$$\Delta_l = \frac{f_d}{k_l}$$

$$\Delta_d = \frac{Q_d}{k_d} = \frac{(\alpha + 1)f_d}{k_d}$$

Donde:

$Q_d = (\alpha + 1)f_d$ , es la fuerza horizontal soportada por la diagonal

reemplazando 2 en 1:

$$u = -\alpha q + \frac{f_d}{k_l} + \frac{(\alpha + 1)^2 f_d}{k_d}$$

$$u = -\alpha q + \left( \frac{1}{k_l} + \frac{(\alpha + 1)^2}{k_d} \right) f_d = -\alpha q + \frac{f_d}{k_{dl}}$$

donde:

$$k_{dl} = \left( \frac{1}{k_l} + \frac{(\alpha + 1)^2}{k_d} \right)^{-1} = \frac{k_l k_d}{(\alpha + 1)^2 k_l + k_d}$$

Entonces:

$$k_{eq} = \alpha_{tg}^2 k_{dl}$$

donde,  $\alpha_{tg} = (\alpha + 1) \frac{\cos \theta \cos \beta}{\cos(\beta + \theta)} - 1$

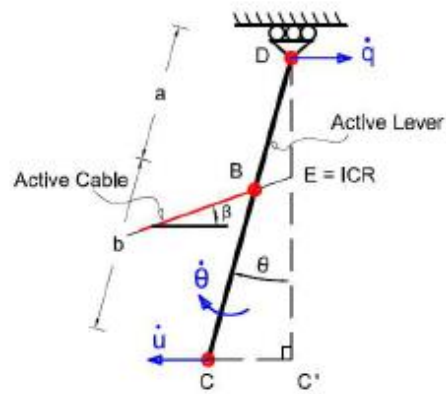


Figura 113, Configuración palanca-diagonal mecanismo "ELAS", (Baquero & Almaz, 2015)